

DEDICACE

Au feu Youssef MOUSTAJIR

A ma mère

A ma sœur Fatima

A tous mes amis

REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer ici mes sincères remerciements et tout mon respect à mon professeur encadrant Abdelfattah BARHDADI pour son soutien, ses précieux conseils, sa patience et sa compréhension. Qu'il accepte le fruit de mon effort comme expression de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier vivement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Je cite en particulier le Pr. Mohammed CHAFIK EL- IDRISSE, de la faculté des sciences de Kénitra et le Pr. Abdenbi BOUZID, de la faculté des sciences de Meknès pour leur coopération scientifique efficace.

Résumé

Dans le présent travail, nous avons abordé quelques aspects des principaux lasers et leurs applications modernes.

La première partie contient quelques généralités sur les lasers: un peu d'histoire, les propriétés fondamentales de la lumière laser et son principe de fonctionnement.

Dans la deuxième partie nous avons rappelé les principaux types des lasers et les domaines d'applications de certains d'entre eux. Ensuite, nous avons classé ces lasers en quatre familles essentiellement distinguées par leur nature de leur milieu actif:

- Les lasers à isolants dopés: leur milieu actif est constitué d'atomes introduits sous forme d'ions métalliques et des terres rares dans une matrice solide en cristal ou en verre.
- Les lasers à gaz: leur milieu actif est un milieu gazeux atomique neutre, ionisé ou moléculaire. L'exemple typique que nous avons choisi est le laser CO₂.
- Les lasers à colorants: leur milieu actif est un colorant organique dilué dans un solvant.
- Les lasers à semi-conducteurs: leur milieu actif est une jonction p-n réalisée sur des matériaux semi-conducteurs

TABLE DES MATIERES**I- INTRODUCTION****II- HISTORIQUE****III- PROPRIETES DE LA LUMIERE LASER**

III-1- Monochromaticité

III-2-Directivité

III-3-Brillance

III-4-Granularité

III-5-Polarisation

III-6-Cohérence

IV- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN LASER

IV -1-Milieu actif

IV-1-1-absorption –émission

IV-1-1-1- Absorption

IV-1-1-2- Emission spontanée

IV-1-1-3- Emission stimulée

IV-1-2-coefficient d'absorption et de gain a faible signal

IV-2- Pompage : création d'une inversion de population

IV-2-1. création d'une inversion de population

IV-2-2 réalisation du pompage

IV-2-3: méthodes de pompage

IV-3-réaction optique Résonateur Laser

V- LES DIFFERENTS TYPES DE LASERS ET LEURS APPLICATIONS

V-1-LES LASERS À ISOLANTS DOPES

V-1-1-Laser à rubis

V-1-2- Laser Nd : YAG

V-1-3-Laser à verre dopé au néodyme

V-1-4-Applications des lasers à isolants dopés

V-1-4-1- Applications médicales: les lasers Nd:YAG

V-1-4-2-Application en télémétrie

V-1-4-3-Soudage par points

V-1-4-4-Perçage

V-1-4-5-Micro usinage

V-2-LASERS A GAZ: LASER CO₂

V-2-1-Processus Physiques.

V-2-2-Applications du laser CO₂

V-2-2-1- Applications en médecine

V-2-2-1-1- Application oto-rhino-laryngologiste

V-2-2-1-2- Applications en dermatologie

V-2-2-1-3- Applications gynécologiques

V-2-2-2- Applications dans les traitements des métaux

V-2-2-2-1- Soudage continu par pénétration

V-2-2-2-2-Trempe superficielle

V-2-2-2-3- Alliages superficiels

V-2-2-2-4- Découpe

V-3-LASERS A COLORANTS

V-3-1-Processus Physiques

V-3-1-1- Le pompage par lampes flash

V-3-1-2- Le pompage par laser

V-3-2- Application des lasers à colorants

V-3-2-1- séparation isotopique

V-3-2-1 -spectrofluorimétrie moléculaire

V-4-LASERS A SEMI- CONDUCTEURS

VI- CONCLUSION

ANNEXES 1, 2, 3 et 4

I- INTRODUCTION

Dans les années 60 les premiers lasers ont vu le jour. Très vite, leur lumière magique a trouvé de multiples applications: les lasers se sont installés dans notre vie quotidienne au cœur de nos lecteurs de disques ou dans les lecteurs des codes barres dans les supermarchés. Ils font la beauté des spectacles qui portent leurs noms. Ce sont aussi de grands instruments de traitement à grande précision. En effet, dans l'industrie, ils coupent, ils soudent et ils percent. En médecine, ils réparent ou brûlent les zones malades sans toucher aux parties saines. Les faisceaux rectilignes des lasers servent aussi à aligner les routes des tunnels. Mais, pourquoi les lasers sont-ils capables de faire toutes ces choses là alors que la lumière ordinaire émise par le soleil ou une lampe classique ne peut pas les réaliser ? C'est parce que la lumière laser est une lumière cohérente, concentrée et composée de photons assimilés à de petits grains d'énergie strictement identiques. Toutes les applications précitées découlent de ces propriétés. Le mot L. A. S. E. R. est un acronyme de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Amplification de la Lumière par Emission Stimulée de la Radiation).

Il y a un demi-siècle, les lasers entraient dans la vie scientifique. Les propriétés extraordinaires de leurs rayonnements laissaient présager une multitude d'utilisation dans les domaines les plus divers, les recherches d'applications suivirent de près les recherches fondamentales.

Les lasers sont très présents dans les laboratoires de recherche et ils sont aussi très divers: il en existe des petits, des moyens et des grands. Les chercheurs peuvent les utiliser dans leur travaux pour des utilisations classiques (alignement, perçage, soudage, découpage...) mais ils peuvent aussi en fabriquer lorsqu'il n'existe pas de lasers qui leur conviennent dans le commerce. C'est le cas de nombreux lasers de puissance, appelés ainsi car leur puissance (énergie délivrée par unité de temps) est élevée. Avec ceux-ci, les chercheurs étudient, par exemple, l'interaction d'une très forte lumière avec la matière.

La recherche sur la technologie des lasers n'est pas terminée. De nouvelles applications pourraient voir le jour dans quelques années. Les chercheurs conçoivent et fabriquent des micro lasers. Par exemple, ils pourront, en particulier, équiper nos voitures pour éviter les collisions.

Ce travail donc a été réalisé dans le but de rappeler les principautés des lasers: leurs caractéristiques, leur principe et leurs domaines d'application les plus fréquentes.

II- HISTORIQUE

L'interaction de la lumière avec la matière était l'une des préoccupations évoquées par l'imagination humaine depuis l'existence de l'homme, depuis que l'homme essaya pour la première fois de concentrer les rayons solaires. Pendant longtemps seul le soleil a constitué une

source de lumière assez intense pour donner lieu à une utilisation à grande distance de cette forme d'énergie.

Il fallut attendre plusieurs siècles de considérations de plus en plus fines sur l'interaction de la lumière avec la matière pour réaliser certains succès ; C'est ainsi qu'en 1905 Einstein publia un article dans lequel il posait l'hypothèse que la lumière est constituée quanta d'énergie. Il postula par la même occasion que l'énergie associée au photon est directement liée à sa fréquence par la relation $E = h\nu$ ou h est la Constante de Planck, ν la fréquence de photon. Douze années plus tard en 1917 il présenta finalement sa théorie sur l'émission stimulée selon laquelle le matériau pouvait émettre de la lumière s'il avait correctement existé. Les bases théoriques de fonctionnement du laser étaient alors jetées mais de nombreux chercheurs pensaient qu'il était techniquement impossible de construire un dispositif produisant de la lumière par émission stimulée.

Un grand pas fut en 1928 lorsqu'un groupe de chercheurs met en évidence expérimentale l'émission stimulée confirmant ainsi la prédiction d'Einstein.

Au cours de la seconde guerre mondiale les États-Unis ont voulu développer de nouveaux systèmes de radar (acronyme de Radio Detecting And Ranging) plus précis. Dans ce but Charles Townner a développé en 1947 une source de micro-onde à plus haute fréquence soit de 24 Ghz. C'est ainsi qu'il fabriqua en 1953 le premier maser (acronyme de: Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation) en collaboration avec certains de ses étudiants. Ce maser utilisait de l'ammoniac (NH_3 gazeux) et produisait un rayonnement monochromatique à une longueur d'onde de 1.25 nm. Au cours des années qui suivaient de nombreux autres masers furent fabriqués. Tous fonctionnaient dans le domaine des "microwave", le pas vers le domaine de la lumière visible et de ses courtes longueurs d'ondes semblant infranchissables. Les expérimentateurs de l'époque entrevoyaient déjà les possibilités d'un maser optique, mais concevaient difficilement comment le construire.

En 1957, Townner commença à considérer les problèmes réalisés à la fabrication d'un dispositif semblable au maser, mais émettant du rayonnement infrarouge ou de la lumière visible, en collaboration avec Arthur Schawlow. Il publia les premières propositions détaillées de maser optique. Ils considèrent alors l'utilisation d'une cavité résonnante pour amplifier la lumière. Ils déposèrent une demande de brevet en 1958. En 1960, ils obtiennent enfin le premier brevet de laser mais celui-ci ne fut construit que plus tard.

Le premier laser fonctionnel fut fabriqué par Théodore Maiman en 1960. Il découvrit que les ions de chrome d'un rubis émettaient de la lumière verte d'une lampe au xénon. En déposant une couche d'aluminium à chaque extrémité de la tige de rubis, Maiman réussit à produire le premier laser optique. L'année suivante le laser à hélium-néon, l'un des plus couramment

utilisés aujourd'hui, fut inventé. Notons que le terme laser (acronyme de: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) (amplification de la lumière par émission stimulée) ne fut pas utilisé avant 1965. Depuis l'invention du laser, les modes de production de rayonnements laser se sont multipliés. On compte maintenant pratiquement autant de lasers différents qu'il y a d'applications pour ceux-ci.

Actuellement, la technologie des lasers ne cesse de développer grâce à la multiplication de ses domaines d'applications. En 2002, il y avait 200.000 lasers installés dans le monde. Le coût total de la machine-outil (c'est à dire machine + laser) a atteint 4 Milliards d'Euros (35% en Europe, 25% au Japon, 25% aux USA et 15% pour le reste du monde); le laser présente 10% du coût total de la machine-outil. Parmi ces 4 Milliards, les systèmes CO₂ de puissance, pour découpe et soudage, ont absorbé environ 40%; 20% pour la réparation électronique et microélectronique. Le coût mondial peut atteindre environ 10 Milliards d'Euros en 2010.

III- PROPRIETES DE LA LUMIERE LASER

La discussion des propriétés de la lumière s'effectue par l'expression mathématique établie par Maxwell constituant la représentation d'une onde. En effet, cette expression décrit de la même manière le champ électrique et le champ magnétique de l'onde, les comportements de ces champs étant complémentaires, il suffit d'étudier un seul d'entre eux. L'onde électromagnétique la plus simple que l'on puisse considérer est une onde sinusoïdale, d'extension infinie, se propageant dans une direction positive de l'axe Oz.

Les variations du champ électrique de l'onde, dans le temps et dans l'espace sont décrites par l'expression :

$$E(r; t) = A \cos(2\pi(vt - z/\lambda) + \varphi)$$

Où A est l'amplitude de l'onde en Volte/mètre, v sa fréquence en hertz, λ sa longueur d'onde et φ la constante de phase.

III-1- Monochromaticité

Les ondes discutées ci-dessus sont monochromatiques; elles décrivent le champ électrique de la lumière supposée d'une fréquence unique, c'est à dire d'une seule couleur. Pour les physiciens, la plus importante propriété de la lumière laser est son extraordinaire monochromaticité. Mais il est impossible, sans l'aide d'instrument sophistiqué, de déterminer à quel degré d'approximation la lumière laser est monochromatique, c'est à dire représentée par l'équation ci-dessus.

En général aucune source, y compris le laser, n'est rigoureusement monochromatique, on peut seulement se rapprocher de plus en plus de la radiation monochromatique. Le degré de

monochromaticité d'une source ou d'une raie spectrale est caractérisé par son étalement en fréquence $\Delta\nu$ ou par l'étalement correspondant en longueur d'onde $\Delta\lambda$ ($\lambda\nu = c$).

Le tableau ci-dessous donne des largeurs des raies des principales sources lumineuses et de quelques lasers particuliers.

Source de lumière	Longueur d'onde (μm)	Largeur de raie $\delta\nu$ (Hz)
Lampe à vapeur de mercure (arc à haute pression)	0.564	$5 \cdot 10^{13}$
Lampe à xénon (arc à basse pression)		10^8
Lumière blanche		$2,5 \cdot 10^6$
Laser CO ₂ Mono-mode Mono-mode stabilisé	10.6 10.6	10^8 10^4
Laser He-Ne Multi-mode Mono-mode Mono-mode stabilisé	0.6328 0.6328 3.39	$1,5 \cdot 10^9$ 10^6 10
Laser Ar	0.488	$5 \cdot 10^8$
Laser Nd: YAG	1.06	$12 \cdot 10^9$
Laser Nd verre	1.06	$3 \cdot 10^{12}$
Laser Rubis	0.6943	$60 \cdot 10^9$

III-2- Directivité :

La directivité d'un faisceau laser se caractérise par son angle total de divergence égal à deux fois l'angle que fait la direction d'un rayon marginal du faisceau avec l'axe de ce dernier.

La propagation d'une onde lumineuse est parfaitement rectiligne. Or comme toutes les ondes du laser se propageant dans la même direction, un faisceau laser n'est pas divergent comme la lumière d'une lampe de poche par exemple; il est parfaitement rectiligne et visible sur de grandes distances.

En général, on désire la plus petite divergence possible. Celle-ci se mesure en milliradian. Rappelons qu'un milliradian représente un écart de 1m à 1km.

Le tableau 2 présente quelques valeurs des divergences rencontrées dans les lasers les plus courants à usage scientifique ou industriel.

	CO ₂	Nd-YAG	Nd-verre	AsGa	Rubie	Ar	He-Ne
Longueur d'onde λ (μm)	10,6	10,6	1,06	0,905	0,6943	0,488	0,6328
Divergence 2θ (mrad)	1 - 10	2 - 10	0,5 - 10	20 - 200	0,5 - 10	0,5 - 1	0,2 - 1

Tableau 2: Valeur moyenne de la divergence naturelle des principaux lasers

III-3- Brilliance:

Les lasers sont des sources de lumière brillante et intense; un modeste laser Hélium- Néon de 1mW est plus brillant que le soleil.

III-4- Granularité:

Quand la lumière d'un laser est réfléchiée par une surface, la tâche lumineuse sur cette surface présente une certaine granularité très particulière qui ne se produit pas avec les autres sources. Cette structure lumineuse paraît se déplacer lorsque l'observateur déplace la tête. La granularité peut s'expliquer par un phénomène d'interférences lumineuses tel que l'expérience de Young.

III-5- Polarisation:

A chaque instant, en tous points de l'espace, le champ électrique a une direction bien déterminée et est décrit par le vecteur E . Ce vecteur est perpendiculaire au vecteur de propagation K qui définit la direction et le sens de la propagation de l'onde. La direction du vecteur E sera appelée direction de la polarisation de la lumière laser.

Les lasers peuvent être polarisés circulairement ou linéairement. Mais, l'émission de beaucoup de lasers est polarisée linéairement dans une direction bien définie.

III-6- Cohérence:

Le degré de cohérence très élevé présenté par la lumière laser est en relation étroite avec l'ensemble des propriétés du laser: brillance, directivité, monochromaticité et polarisation. La cohérence est une manifestation de grande régularité dans le temps et dans l'espace. La cohérence est manifestée simultanément par sa monochromaticité (cohérence temporelle) et son front d'onde uni-phase.

En conclusion, la lumière laser offre la possibilité d'être concentrée grâce à ses propriétés de cohérence: cohérence temporelle qui permet une concentration d'énergie dans l'espace des fréquences ou bien dans le temps; cohérence spatiale permettant aussi bien de focaliser très fortement l'énergie que de réaliser des faisceaux extrêmement parallèles.

IV- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN LASER:

Un laser est une source de rayonnement dans laquelle un photon émis par un atome excité est contraint d'extraire de l'énergie des autres atomes excités, créant par la même d'autres photons et augmentant ainsi l'amplitude du champ électromagnétique originale. Il faut donc disposer d'un grand nombre d'atomes excités qui soient susceptibles d'être stimulés. Trois éléments sont donc nécessaires:

- *Un milieu actif: des atomes émetteurs de rayonnement.*
- *Un pompage produisant une inversion de population.*
- *Une cavité résonante: une réaction optique faisant l'amplification.*

IV-1- Milieu actif:

C'est un milieu qui possède une structure appropriée des niveaux d'énergie discrets s'excitant facilement et possédant la capacité de stocker l'énergie reçue de l'extérieur. L'émission laser se fait à une longueur d'onde déterminée par deux états d'énergie de cette structure, sur une transition où le système présente une émission spontanée correspondant à une durée de vie relativement longue du niveau supérieur (état métastable).

Dans les spectres discrets d'absorption ou d'émission, les raies ne sont jamais strictement monochromatiques. La raie utilisée dans un laser possède une certaine largeur spectrale $\Delta\nu$ déterminée par différents mécanismes atomiques d'élargissement et mesurant la dispersion en fréquence autour de la fréquence centrale.

IV-1-1- Absorption–émission:

IV-1-1-1- Absorption:

Si le milieu atomique est soumis à un champ électromagnétique et que les photons de fréquence ν_{21} sont présents, l'atome peut en absorber un et se trouver ainsi porté de l'état d'énergie E_1 à l'état d'énergie supérieure E_2 . Il y a disparition du quantum du champ au profit du système atomique.

IV-1-1-2- Emission spontanée :

Dans ce processus l'atome effectue spontanément une transition d'un état excité E_2 vers un état de moindre d'énergie E_1 en émettant un quantum d'énergie $h\nu_{21} = E_2 - E_1$.

L'émission spontanée a la propriété d'être isotrope, l'instant d'émission étant aléatoire. Si de nombreux atomes se trouvent simultanément dans un même état excité, l'émission collective sera donc étalée dans le temps: c'est le phénomène de fluorescence. Le temps caractéristique τ de désexcitation des atomes est appelé durée de vie moyenne de l'état excité au sens statistique du terme. Lorsque ce temps est long à l'échelle atomique, on dit que le niveau supérieur est métastable.

IV-1-1-3- Emission stimulée :

C'est le processus réciproque de l'absorption. En présence d'un champ, un photon d'énergie précisément égale à ν_{21} induit un atome à effectuer une transition du niveau supérieur E_2 vers le niveau inférieur E_1 : l'atome émet un second photon dont, non seulement la fréquence

ν , mais toutes les autres caractéristiques (direction, phase, polarisation, ...) sont identiques à celle du photon inducteur. Cette création d'un second photon résulte d'un couplage entre l'onde incidente et le système atomique s'apparentant aux résonances rencontrées dans les phénomènes vibratoires. Le système atomique recevant un photon en fournit un second: il agit donc en amplificateur de rayonnement. C'est ce processus de l'émission stimulée qui est à l'origine du fonctionnement du laser.

Les diagrammes de la figure 1 représente schématiquement ces trois processus :

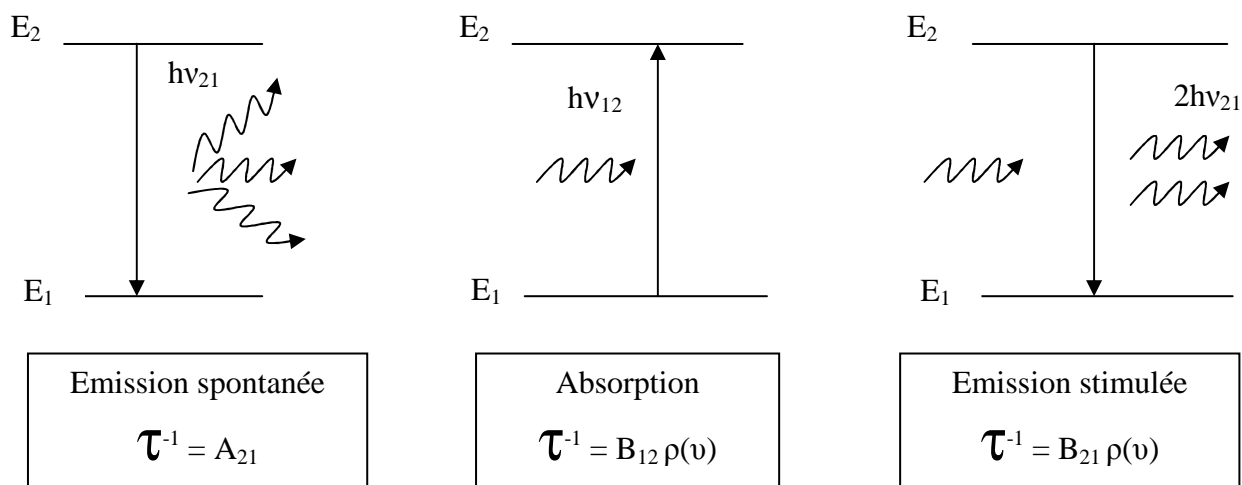


Figure 1: Transitions radiatives entre deux niveaux d'énergie. Les lignes horizontales correspondant aux niveaux d'énergie, les verticales indiquent le sens de la transition, tandis que les flèches horizontales symbolisent les photons incidents ou résultants.

En regard de chaque type de transition est porté le coefficient d'Einstein, représentant la probabilité de transition considérée par atome et par unité de temps. $\rho(\nu)$ est la densité spectrale d'énergie du rayonnement.

D'après ces définitions, il apparaît que les processus d'absorption et d'émission stimulée s'effectuent avec une probabilité directement proportionnelle au coefficient B_{12} près et à l'intensité du champ incident; ce qui n'est pas le cas de l'émission spontanée. On conçoit donc qu'on augmentant $\rho(\nu)$ on puisse faire en sorte que l'émission stimulée l'emporte sur l'émission spontanée.

Par des arguments quantiques simples, on peut établir entre les coefficients d'Einstein deux relations capitales : l'une exprime l'égalité des probabilités de transition par absorption et par émission stimulée, tandis que l'autre relie entre eux les coefficients d'émission spontanée A_{21} et d'émission stimulée B_{21} .

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$$

$$A_{21} = h\nu (8 \pi \nu^2 / c^3) B_{21}$$

Les poids statistiques g_1 et g_2 représentent la dégénérescence des états considérés: ils indiquent le nombre de façons indépendantes que possède l'atome d'avoir une même énergie.

Les transitions entre états sont répertoriées en deux catégories: les transitions à probabilités élevées dites transitions permises (durée de vie de la transition $\tau = 10^{-8}$ s) et les transitions à probabilités très faibles dites transitions interdites (durée de vie de la transition de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-2} s). Des transitions quelconques entre n'importe quels états ne sont en général pas permises. Les règles déterminant les possibilités de transition sont appelées règles de sélection: elles fixent les transitions autorisées ainsi que le nombre entier d'unités dont peut varier chaque nombre quantique pour la transition considérée.

IV-1-2- Coefficient d'absorption et de gain à faible signal:

Considérons un faisceau parallèle se propageant selon Oz dans un milieu à deux états d'énergie E_1 et E_2 ($E_2 > E_1$). L'intensité $I(z)$ de la radiation est donnée par la loi de Beer:

$$I(z) = I(0)e^{-\alpha z} = I_0 e^{-\alpha z}$$

Où le coefficient d'absorption α est tel que :

$$\alpha = B_{12} (N_1 - N_2) (h\nu_{12} / CA\Delta z)$$

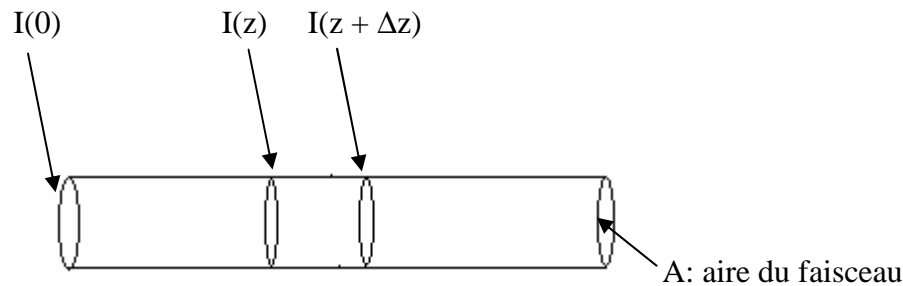


Figure 2: Pompage d'un faisceau parallèle à travers un gaz absorbant

Normalement, $N_1 > N_2$ et α est positif, il y a donc absorption. Si on crée des conditions où $N_2 > N_1$, α sera négatif et l'exposant $(-\alpha z)$ est positif, le faisceau va donc croître avec z à savoir $I(z) = I_0 e^{\beta z}$ où β est le coefficient de gain pour les signaux faibles. Le faisceau est alors amplifié au lieu d'être atténué. Ce processus provoquant l'augmentation de la lumière par l'émission stimulée est à la base du fonctionnement du laser.

IV-2- Pompage: création d'une inversion de population:

IV-2-1- Création d'une inversion de population:

La seule découverte de l'émission stimulée n'a pas été suffisante pour créer des lasers. En effet, dans la matière les atomes sont beaucoup plus nombreux dans l'état non excité que dans l'état excité. Il n'est donc pas possible de provoquer assez d'émission stimulée pour

produire de la lumière laser. Il fallait trouver une moyenne de renverser la tendance et d'obtenir dans le milieu plus d'atomes excités que d'atomes au repos. Ce processus est appelé inversion de population. Donc, obtenir l'inversion de population c'est créer plus d'atomes excités que d'atomes non excités.

IV-2-2- Réalisation du pompage:

Lorsque le milieu actif d'un laser comprenait seulement deux niveaux (l'état fondamental et un état excité), il serait impossible de placer la majorité des atomes dans l'état excité. C'est pourquoi les systèmes atomiques ou moléculaires couramment utilisés fonctionnent soit sur trois niveaux soit sur quatre niveaux, soit encore avec un transfert résonnant d'énergie. La figure 3 résume ces trois principaux systèmes atomiques rencontrés dans les lasers.

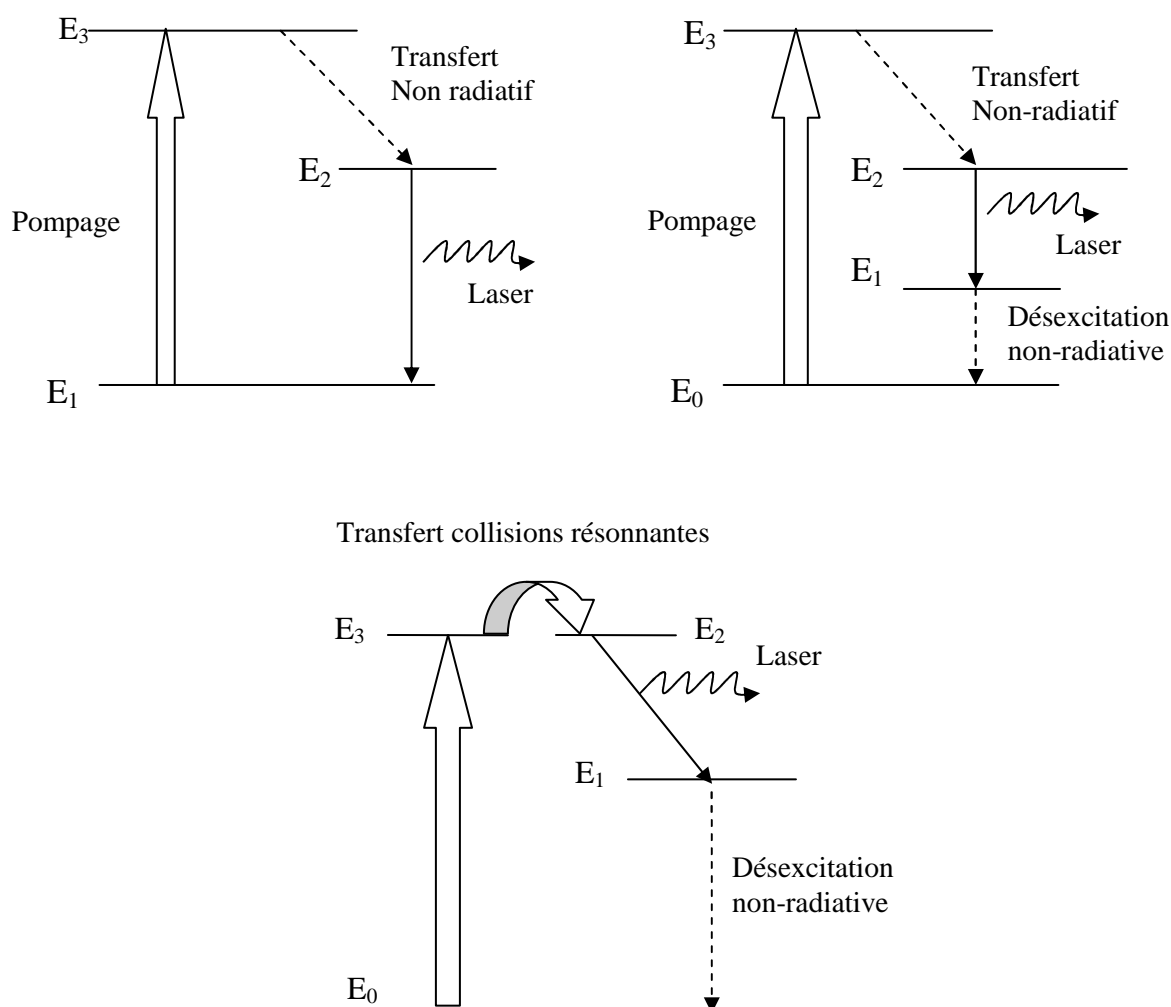


Figure 3: Schéma général des processus de pompage, de désexcitation et d'émission laser dans les principaux systèmes atomiques

IV-2-3- Méthodes de pompage:

Il existe de nombreuses méthodes pour réaliser une inversion de population. La différence entre ces méthodes renvoie au type de source utilisée pour réaliser le pompage. Presque n'importe quelle source d'énergie, même un autre laser, peut être utilisée comme source extérieure d'excitation, voici quelques méthodes de pompage les plus employées avec succès :

- Pompage optique:
 - incohérent : lampe flash, lampe à arc
 - cohérent : autre laser
- Pompage électronique:
 - décharge électrique (continue, radio-fréquence,...)
 - faisceaux d'électrons
- Pompage thermique:
 - détente hydrodynamique
- Pompage chimique:
 - combustions chimiques exothermiques (flammes)
 - produits de fission d'un réacteur
- Pompage par rayonnement ionisant:
 - explosion nucléaire
 - source des rayons X

IV-3- Réaction optique-résonateur laser :

Pour obtenir un effet laser efficace, on place le milieu optiquement actif, c'est-à-dire les atomes qui subissent l'inversion de population et l'émission stimulée, dans une cavité entre deux miroirs disposés face à face. Ainsi, chaque photon fait plusieurs allers et retours; d'où un nombre plus important d'émissions induites par lui-même. Il reste à aménager une "ouverture" pour qu'une partie du rayonnement s'échappe de la cavité: c'est le rayon laser. Pour ce faire, il suffit que l'un des deux miroirs soit partiellement réfléchissant.

La longueur d'onde ou la fréquence du faisceau émis dépend des dimensions de la cavité. En effet, la longueur d'onde des ondes lumineuses allant et venant dans la cavité et donnant lieu à l'effet laser doit être un diviseur entier de la longueur de la cavité. Sans cela, il se produirait des interférences destructives entre les ondes se propageant dans un sens et celles se propageant dans l'autre. Pour obtenir la longueur d'onde désirée, on peut donc jouer sur la longueur de la cavité.

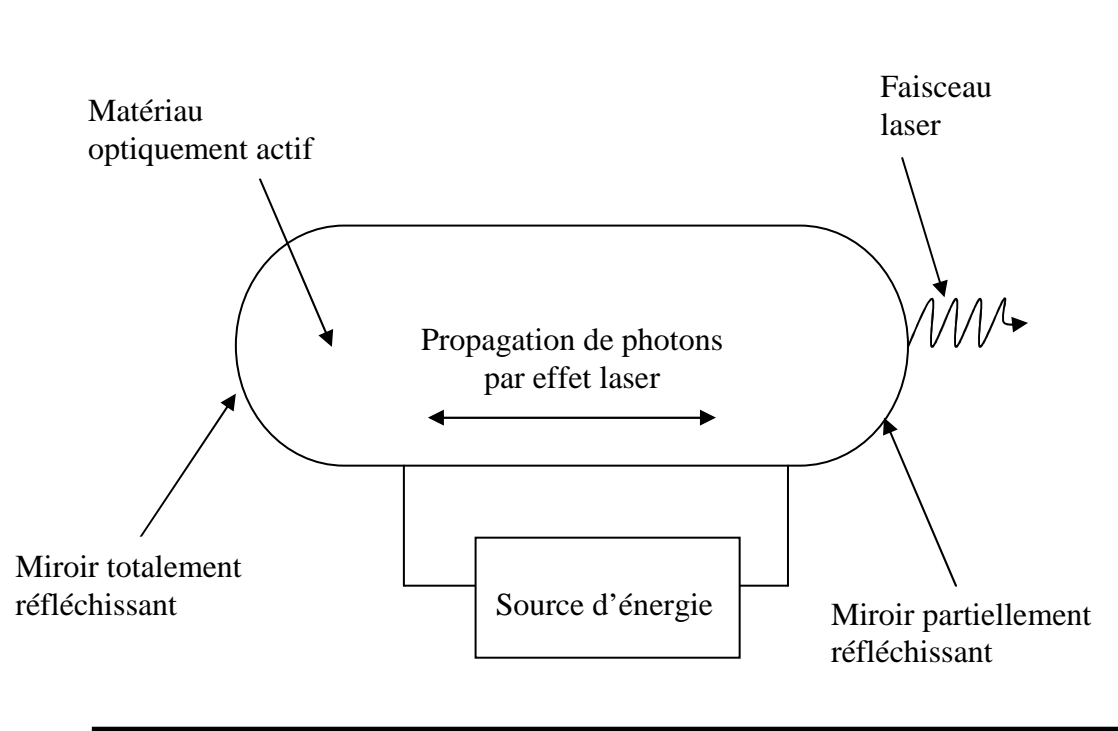


Figure 4: Schéma de principe d'un laser

V- LES DIFFERENTS TYPES DE LASERS ET LEURS APPLICATIONS

A cause de la diversité des applications des lasers, il n'est évidemment pas possible de rendre compte en détail de cette révolution technologique, et c'est pourquoi on se contentera de donner les applications les plus connues. On va donner une description de chaque type de laser, et au fur et à mesure on va donner quelques applications.

On classera d'abord ces lasers en quatre familles essentiellement distinguées par la nature de leurs milieux actifs:

- **Les lasers à isolants dopés:** dans les quels le rayonnement en provenance d'une lampe flashe ou d'une lampe à arc excite optiquement l'émission d'atomes induits sous forme d'ions métalliques et de terres rares dans une matrice solide isolante en cristal ou en verre. La conception de ces différents types de lasers est très semblable et même par fois identique d'un type de laser à l'autre, excepté pour le barreau ou quelques éléments d'optique utilisés.

- **Les lasers à gaz:** qui constituent la majeure partie de l'industrie laser et fonctionnent sur une excitation, généralement de nature électronique mais par fois aussi de nature chimique, de milieux gazeux atomiques neutres, ionisés moléculaires. Deux modes de fonctionnement peuvent être rencontrés, continus ou impulsionnels avec deux régimes gazeux, en flux ou en régime scellé.

- **Les lasers à semi-conducteurs :** dans lesquels le rayonnement est émis au sein d'une jonction p-n dans une diode de type semiconducteur. La longueur d'onde dépend de la composition de ce matériau, les caractéristiques de fonctionnement sont liées à la composition, aussi qu'à la structure du dispositif.

- **Les lasers à colorants :** qui opèrent tous avec le même type de milieu actif, un colorant organique dilué dans un solvant liquide, mais tirent leurs énergie du rayonnement émis par d'autres sources optiques (lampe flashe ou un autre laser). Leurs caractéristiques dépendent de façon critique de celle de la source de pompage.

V-1- Les lasers à isolants dopés:

Le milieu actif de ces lasers est constitué par des ions métalliques (Cr^{3+} , Vd...) ou par des terres (Nd^{3+} , Sm ...) entrants en substitution dans le réseau d'une matrice cristalline ou d'une matrice amorphe. En raison de l'apparition de dislocations atomiques dans le cristal un tel réseau ne peut accepter qu'une faible concentration molaire de substituant, mais néanmoins du fait de la grande densité atomique de l'état solide, ces concentrations représentent des densités de dopants de 10^{19} atomes/cm³ ou d'avantage, ce qui prédispose ces lasers à fonctionner à des puissances très élevées.

V-1-1- Laser à rubis:

Le laser à cristal de rubis fut réalisé en premier lieu par T. Maiman (1960). L'excitation résulte d'une décharge dans un tube à néon enroulé en hélice autour du cristal. Celui-ci d'une longueur de quelques centimètres, à ces faces terminales (dont le diamètre est de quelques millimètres) planes parallèles, et recouvertes de couches très réfléchissantes (l'une d'elles ayant cependant un facteur de transmission de quelques centièmes). La longueur d'onde émise est de 694,3 nm (rouge extrême) à température ordinaire. En fonctionnement relaxé, un laser à rubis peut délivrer des énergies de l'ordre de quelques dizaines de joules pour des durées d'impulsion de l'ordre de la microseconde, soit des puissances crêtes de quelques watts. En fonctionnement déclenché, on obtient couramment quelques joules pour des impulsions d'une certaine de mono secondes, soit des puissances crêtes comprises entre 30 et 100 MW environ. La cadence maximale réalisée avec de tels lasers ne dépasse pas quelques dizaines de hertz

V-1-2- Le Laser Nd:YAG

L'un des lasers les plus importants, puisque son rôle est prépondérant dans les nombreuses applications industrielles ou scientifiques, est le laser à néodyme : le Grenat d'Yttrium et d'Aluminium ($Y_3Al_5O_{12}$), en abrégé YAG, contenant en faible quantité du néodyme, qui est l'atome « actif ». Alors que le rubis est un corps à 3 niveaux, Le néodyme met en jeu le pompage à quatre niveaux, de ce fait, la puissance requise pour le pompage est plus faible, et le rendement peut atteindre 3% soit plus de dix fois celui de laser à rubis. L'émission du néodyme a lieu dans le proche infrarouge à 1,06 μm .

Pour le reste, la constitution des lasers à néodyme dans le YAG est comparable à celle des lasers à rubis, au point que certains systèmes laser peuvent recevoir indifféremment (avec éventuellement un changement de miroirs) un bourreau de rubis ou de néodyme.

En ce qui concerne les énergies maximales émises, elles sont sensiblement proportionnelles au volume des barreaux, pouvant atteindre une certaine de joules à chaque éclair de pompage pour les plus gros rubis ($\varnothing = 2$ cm, $L = 20$ cm) et une cinquantaine de joules pour les plus gros cristaux de YAG ($\varnothing = 2$ cm, $L = 20$ cm). il faut, bien entendu, que l'énergie fournie à la lampe éclair de pompage soit suffisante. La durée de l'émission laser dépend de celle du pompage. Elle est typiquement du même ordre (quelque milli-seconde). Pendant ce temps, l'intensité émise n'est généralement pas uniforme, mais se présente plutôt comme une suite d'impulsion irrégulière.

Le néodyme dans le YAG présente cependant un autre mode de fonctionnement: en effet, grâce au rendement de pompage relativement élevé, une émission continue est possible à

condition de pomper en continu, et de refroidir très énergiquement le cristal (et la lampe de pompage). On a pu ainsi engendrer, avec les plus gros cristaux, près de 1 kW en continu.

V-1-3-Laser à verre dopé au néodyme :

Parmi les lasers à isolants dopés, le laser à verre dopé avec des ions de néodyme occupe une place essentielle, en raison de puissances crêtes extrêmement élevées qu'il permet d'engendrer.

C'est un laser à 4 niveaux dont la structure est très voisine de celle du Nd:YAG, excepté que la transition principale est située à $\lambda = 1,062 \mu\text{m}$, le niveau inférieure étant situé approximativement 1950cm^{-1} au-dessus du niveau fondamental. Bien que les verres utilisés (silicate, phosphate) soient macro-scopiquement amorphe, les champs électriques locaux microscopiques dédoublent les niveaux d'énergie de l'ion, c'est en fait quatre émissions qui sont théoriquement réalisables.

Contrairement au cas des ions implantés dans une matrices cristalline, la structure amorphe du verre fait varier d'un ion à un autre les champs électriques auxquels ceux-ci sont soumis : pour cette raison, les dédoublements de niveaux sont moins bien définis. En conséquence, différents ions rayonnent à des fréquences légèrement décalées, ce qui entraîne un élargissement homogène du spectre d'émission spontanée. La largeur de raie de la fluorescence est 50 fois celle rencontrée dans le YAG puisqu'elle approximativement de 200 cm^{-1} .

Il n'y a pas, en principe, de limitation dimensionnelle dans la fabrication des vers dopés avec des ions de néodymes : les barreaux élaborés par coulée et usinage ultérieur, peuvent se présenter sous des dimensions nettement supérieures à celle du rubis. Le volume de stockage peut ainsi être considérablement augmenté et les limites se trouvent alors très imposées l'homogénéité et l'absence de défauts du matériau, ainsi que la possibilité d'évacuer les calories déposées lors du pompage. Les diamètres peuvent dépasser la dizaine de centimètres, et on a même été amené à remplacer les barreaux par une succession de disques elliptiques d'épaisseur nettement inférieure au petit axe, et donc de fabrication et de refroidissement plus aisés que ceux des barreaux allongés.

Le seuil de ces lasers est cependant beaucoup plus élevé que celui des lasers Nd:YAG puisque la largeur de raie est plus grande. Le volume actif étant considérablement plus grand, les impulsions sont donc très énergétiques : à de faibles cadences de quelques impulsions par minute, les lasers courants délivrent des énergies de 10 J à 100 J sur des durées de 15 ns à 20 ns. La technologie de ces lasers est en tous points semblable à celle des autres lasers à isolants dopés.

Ces lasers se présentent ainsi sous formes de chaînes. Le premier élément de chaîne est un oscillateur pico-secondes stabilisé de faible énergie; le faisceau ainsi engendré est ensuite amplifié dans une succession d'amplificateurs laser constitués par des barreaux actifs excités par flashes, mais sans cavité résonnante.

Le tableau 4 donne une comparaison quantitative des propriétés physiques et des performances des trois principaux lasers à isolants dopés.

Paramètre d'onde laser	Dimension	Rubis	Nd:YAG	Nd:verre
Longueur d'onde laser	μm	0,6943	1,0641	1,0623
Energie de photon	J	$2,86 \cdot 10^{-19}$	$1,86 \cdot 10^{-19}$	$1,86 \cdot 10^{-19}$
Section d'émission stimulée	cm^{-2}	$2,5 \cdot 10^{-20}$	$88 \cdot 10^{-20}$	$3,03 \cdot 10^{-20}$
Durée de vie spontanée	μs	3000	140	300
Densité de dopage	cm^{-3}	$1,58 \cdot 10^{19}$	$1,38 \cdot 10^{20}$	$2,83 \cdot 10^{20}$

Tableau 4: Comparaison quantitative des propriétés physiques et des performances des trois principaux lasers à isolants dopés

V-1-4- Les applications du laser à isolants dopés:

V-1-4-1- Applications médicales: les lasers Nd:YAG

A émission continue, ils sont utilisés en vaporisation et en coagulation, le plus souvent par voie endoscopique.

Leur puissance est comprise entre 50 et 100 W, ce qui nécessite une alimentation électrique relativement importante (10 à 15 kV) en monophasé ou en triphasé suivant les modèles, et un refroidissement extérieur par circulation d'eau dans la plupart des cas.

Le faisceau dans le proche infrarouge (1,06 μm), donc invisible, est visualisé à l'aide d'un faisceau rouge auxiliaire, issu d'un laser He-Ne de faible puissance (1 ou 2 MW), superposé au moyen d'un miroir dichroïque (figure 5).

Le faisceau principal est arrêté ou transmis à volonté par un obturateur qui permet de régler la durée d'émission entre 0,1 et quelques secondes. La puissance est mesurée à la sortie de la tête laser et affichée sur le tableau de commande, en tenant compte de pertes du système de transmission (environ 15 %). En outre, dans certains appareils, un second watt-mètre permet de mesurer la puissance en sortie de fibre afin de re-calibrer périodiquement l'affichage du tableau.

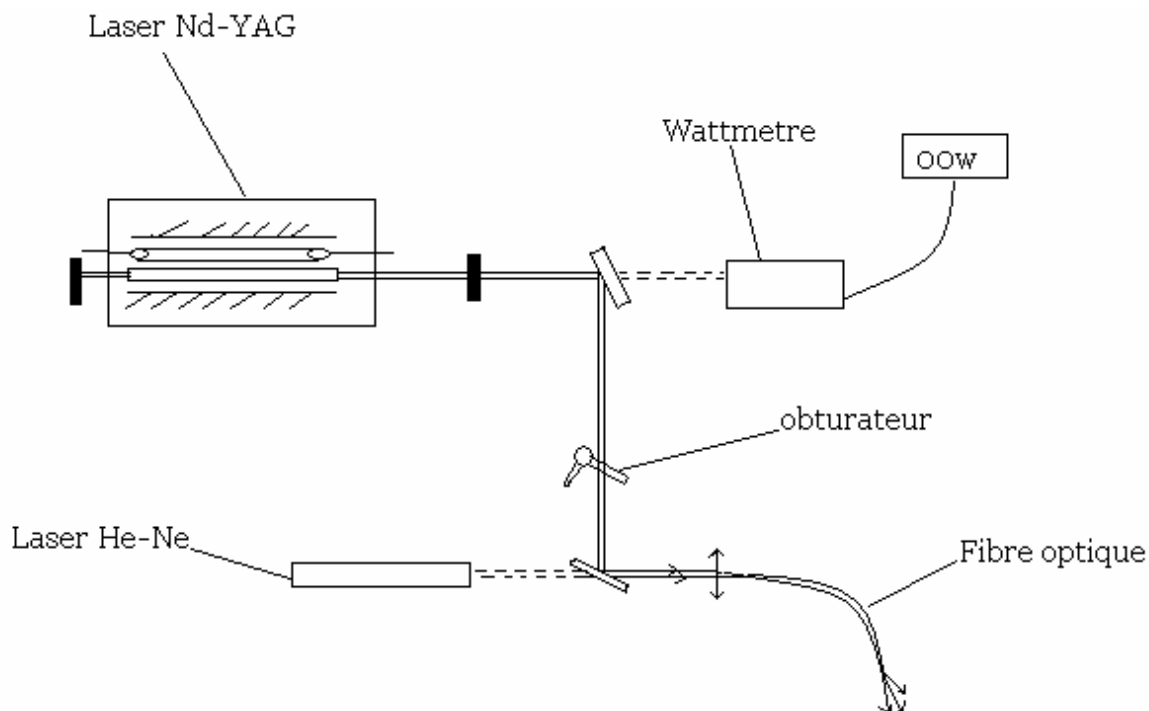


Figure 5: Laser médical au YAG-Neodyme

Le faisceau est transmis par une fibre optique de 400 ou 600 μm de diamètre utile. Dans certaines utilisations comme en pneumologie et en gastro-entérologie, cette fibre est protégée par un jet de gaz coaxial. Dans d'autres utilisations comme en urologie, elle est utilisée nue en milieu liquide. Pour certaines interventions, en chirurgie hépatique par exemple, le chirurgien utilise une pièce à main adaptée en bout de fibre et permettant de concentrer le faisceau laser.

Un laser peu connu mais potentiellement très intéressant est le laser Nd:YAG relaxé. C'est un laser impulsionnel, excité par une lampe à éclairs, et qui émet librement pendant une durée voisine de la durée d'excitation. Ainsi donc, suivant le circuit d'alimentation de la lampe, la durée des impulsions est comprise entre 0,1 et 10 milli-secondes et la puissance crête est de quelques centaines de watts. Un tel laser permet d'obtenir un effet de photo-coagulation plus profond que celui du laser à Argon, avec un minimum de diffusion thermique. On envisage son utilisation en photo-coagulation rétinienne.

Le laser Nd:YAG à "modes bloqués" dans lequel, au moyen d'un absorbant saturable placé dans une cavité, on obtient un train d'impulsions très courtes (quelques dizaines de pico-secondes). La puissance crête de ces impulsions est considérable (10^7 à 10^8 W) ce qui permet, au foyer d'une lentille, d'obtenir une densité de puissance proche de 10^{12} W.cm⁻².

Le laser Nd:YAG déclenché qui, au moyen d'un obturateur rapide placé dans la cavité, permet d'obtenir les impulsions de 10 à 20 nano-secondes, avec des puissances crête de quelques mégawatts (10^6 à 10^7 W).

Ces deux derniers types de laser (déclenché ou en mode bloqué) sont couramment utilisés par la plupart des ophtalmologistes. Ils sont utilisés en chirurgie intraoculaire. Ils n'ont pas

d'effet thermique mais la création instantanée au point de focalisation d'un micro-plasma, source de phénomène mécanique et électrique, permet de couper tous les tissus intraoculaires. Ainsi, sans anesthésie et en ambulatoire, peut-on par exemple détruire les brides intraoculaires post-opératoires, les membranules postérieures après implant cristallinien, ouvrir la capsule antérieure du cristallin avant intervention pour cataracte, ou traiter certaines formes de glaucomes.

Le laser Nd:YAG est aussi utilisé en oto-rhino-laryngologie. Emettant dans le proche infrarouge (1,06 μm) et relié à un bio-microscope, par l'intermédiaire d'une fibre optique, on l'utilise dans des interventions chirurgicales sur l'oreille moyenne et interne.

En gastro-entérologie s'est développé, dans les dernières années, le traitement de certaines lésions par voie endoscopique, grâce à un apport d'énergie à l'extrémité distale de l'endoscope. Jusqu'à présent celle-ci était fournie essentiellement par un courant électrique de haute fréquence. La mise au point de fibres optiques souples permettant le transfert énergétique de la lumière laser de la source au point d'impact, en passant par les endoscopes souples, a permis en gastro-entérologie d'utiliser cette nouvelle forme d'énergie en endoscopie thérapeutique.

Le laser utilisé est en général un Nd:YAG dont la longueur d'onde d'émission est transmissible par fibre optique.

V-1-4-2- Applications en télémétrie:

Historiquement, c'est le laser rubis qui a été le premier utilisé en télémétrie-laser militaire. Il émettait dans la partie rouge du spectre visible à 694,3 nm. Ce laser fait partie de la catégorie des lasers à trois niveaux, et son émission varie très sensiblement avec la température. C'est en particulier pour cette raison que, assez rapidement, on lui a substitué des lasers à quatre niveaux: les lasers à verres dopés ou à YAG dopé au néodyme, émettant à 1,06 μm , car ceux-ci ne présentent pas d'inconvénient.

L'effet laser est obtenu par illumination du barreau actif par un tube flache, délivrant une puissance lumineuse importante pendant un temps de l'ordre de quelques centaines de μs , ou par une lampe à spectre continue. Un système de déclenchement (prisme tournant, cellule de pockels, ...), mis en œuvre lorsque l'inversion de population est maximale, permet d'obtenir une émission de lumière cohérente dans un temps très court qui, dans un télémètre classique, est compris entre 20 et 30 ns.

V-1-4-3- Soudage par points:

Le soudage par points au laser constitue une solution polyvalente pour la soudure de petites pièces. Les lasers à rubis ou à verre dopé au néodyme sont en général des sources utilisés pour produire des impulsions normales d'une durée de quelques ms (3 ms typiquement)

nécessaires à ce type d'application: des capsules de transistors en alliage de nickel sont ainsi fabriquées industriellement. Les lasers à rubis sont particulièrement bien adaptés au soudage par points de fils de cuivre en raison de la forte réflectivité de ce matériau. A titre d'exemple, il faut une impulsion de 10 J pour souder des fils de cuivre de 0,25 mm de diamètre avec cette technique.

V-1-4-4- Perçage

L'ablation de matière fut la première démonstration des capacités métallurgiques des lasers. Dans cette technique, le matériau situé au point d'impact du faisceau laser est sublimé en le portant à sa température d'ébullition et quitte la zone irradiée sous forme de vapeur. C'est un procédé d'usinage relativement onéreux mais il peut se justifier si de fortes productivités sont recherchées ou si les matériaux sont particulièrement durs.

Pratiquement, tous les matériaux peuvent être ainsi percés avec un ou plusieurs types de lasers. D'une façon générale, les caractéristiques demandées aux sources employées pour le perçage sont:

- La capacité de focalisation sur un petit diamètre.
- La capacité de contrôle de la durée de l'impulsion laser de façon à maîtriser la profondeur de pénétration.
- Le bon contrôle de la distribution spatiale de l'énergie du faisceau.
- La comptabilité avec une commande numérique.

La liste des lasers qui satisfont à ces critères est assez différente de celle des lasers de soudage. La raison en est que le paramètre physique essentiel est ici la puissance crête. Aussi les lasers les plus courants sont-ils les lasers à impulsions tels que le rubis, l'alexandrite, le Nd:YAG et le Nd:verre.

Du point de vue des matériaux, les paramètres importants pour la perforation sont:

- La réflectivité à la longueur d'onde incidente.
- La diffusivité thermique.
- La chaleur latente de vaporisation.

Dans le perçage de précision de pièces métalliques, des lasers Nd:YAG sont utilisés pour fabriquer des mesures de débit ou pour percer des orifices d'injecteurs.

Dans l'industrie aérospatiale, des perceuses laser sont souvent utilisées pour forer des trous dans des pièces usinées faites avec des matériaux très durs: on perce ainsi des ensembles complexes de petits trous de refroidissement dans les ailettes de turbines de turboréacteurs

(orifices de 0,5 mm sur 15 mm de profondeur); on perce aussi des chemises des chambres de combustion afin de contrôler la corrosion.

V-1-4-5- Micro-usinage:

La fabrication de composants pour la microélectronique utilise à ce jour plusieurs milliers de lasers. Les usinages, rectifications des résistances, traçage, concernent des petites pièces ou bien des petites zones de travail, et font appel à des lasers à impulsions. C'est aussi le cas du marquage ou de la gravure.

Les lasers peuvent former directement des éléments de circuits électroniques en vaporisant des portions de films minces de tantale, de chrome ou de nickel-chrome déposés sur des substrats transparents. On peut ainsi fabriquer dans le composant lui même des résistances et des condensateurs.

La rectification des résistances ou l'ajustage des résistances signifie l'augmentation de la valeur de résistance électrique de la couche mince en effectuant une coupe partielle de cette couche. La valeur de la résistance est mesurée simultanément et lorsqu'elle atteint la valeur désirée, le laser est arrêté. Un laser à impulsions peut ajuster la résistance du film en vaporisant le matériau: un contrôle en boucle fermée permet d'obtenir des précisions de 0,1% sur la valeur de la résistance.

Le système utilisé en général un laser Nd:YAG qui autorise des largeurs de trait très faibles. Le laser est déclenché à 1 kHz; il délivre des impulsions d'une durée voisine de 200 ns et fournit une puissance crête comprise entre 1 et 10 kW. Le balayage du faisceau est obtenu par des miroirs galvano-métriques commandés par un micro-ordinateur. L'ensemble contrôle le cheminement du conducteur et les cycles d'évaporation effectués par le laser. Des traits de coupe de 1 μm de large dans des couches d'or et de 0,4 μm de large dans des films de nickel-chrome sont ainsi engendrés à des vitesses de 1,5 ms^{-1} sans dégradation du substrat.

V-2- LES LASERS A GAZ: LASER CO₂

D'un point de vue scientifique ou industriel, le laser au dioxyde de carbone CO₂ est indubitablement le plus important des lasers à gaz. Les transitions entre niveaux rotationnels-vibrationnels de la molécule de CO₂ correspondent à de nombreuses émissions infrarouge à des longueurs d'ondes comprises entre 9 et 11 μm . Le laser CO₂ peut fournir des puissances continues allant de la fraction de Watt pour les applications scientifiques, à des dizaines de kilowatts pour le travail des matériaux, et ceci avec des rendements remarquables (jusqu'à 30%). Le laser CO₂ peut aussi fournir des impulsions intenses très brèves allant des faibles énergies (quelques mJ) pour la télémétrie infrarouge, à des énergies beaucoup plus importantes (quelques kJ) pour les applications de recherche dans la fusion nucléaire contrôlée. Cette

diversité provient du fait qu'il existe plusieurs types distincts de laser CO_2 qui partagent naturellement le même milieu actif mais qui diffèrent profondément dans leur structure interne, et surtout dans leurs caractéristiques fonctionnelles.

V-2-1- Processus physiques

Le milieu actif d'un laser CO_2 est généralement constitué d'un mélange de dioxyde de carbone, d'azote N_2 et d'hélium He . Chacun de ces trois constituants joue un rôle crucial.

La molécule linéaire de CO_2 possède trois modes de vibration v_1 , v_2 et v_3 : mode symétrique, mode de flexion et mode asymétrique respectivement. Chacun de ces modes est quantifié et leurs premiers niveaux existés sont respectivement situés à 1337 cm^{-1} , 667 cm^{-1} et 2349 cm^{-1} par rapport au niveau fondamental. Chacun de ces niveaux est lui-même subdivisé en sous-niveaux correspondant à la quantification de l'énergie de rotation de la molécule.

La molécule d'azote N_2 ne possède évidemment qu'un mode de vibration et son premier niveau de vibration est très voisin du premier niveau, noté $00^0 1$, du mode v_3 de CO_2 .

Une décharge électrique dans le mélange gazeux libère des électrons qui, par arrachement aux molécules CO_2 et N_2 et retour à l'état neutre, excitent leur niveaux de vibration. Or, les modes v_1 et v_2 de CO_2 se dés excitent par collision beaucoup plus rapidement que le mode v_3 et celui de N_2 . Il s'ensuit une inversion de population entre le niveau $00^0 1$ du mode v_3 et les niveaux $02^0 0$ ou $10^0 0$ des modes v_1 et v_2 . D'où l'émission de nombreuses raies laser sur les transmissions de vibration-rotation correspondantes vers $10\text{ }\mu\text{m}$. La puissance de ce type de laser est considérablement augmentée si l'on rajoute de l'hélium au mélange. L'hélium a un double rôle: il dés excite, par collision moléculaire, les niveaux d'arrivée $10^0 0$ et $02^0 0$ des transitions laser et favorise l'évacuation de la chaleur vers les parois du tube grâce à sa grande conductibilité thermique. Ce type de laser a un excellent rendement (de l'ordre de 20%) et la puissance d'émission peut atteindre couramment 500 W. Des puissances de l'ordre de 500 kW ont été atteintes par détente du gaz préalablement porté à haute température.

A l'intérieur de chaque raie du laser à CO_2 , la plage d'accord de l'émission laser est faible (de l'ordre de quelques 10^7 Hz) car la pression du gaz n'est pas assez forte pour élargir les raies par les collisions moléculaires. Pour certaines applications, notamment en spectroscopie, il est utile d'étendre cette plage d'accord en augmentant la pression du gaz. Cependant, en régime continu, une décharge électrique dans un gaz à pression élevée dégage beaucoup de chaleur qui détruit les conditions nécessaires à l'établissement d'une inversion de population. L'évacuation de cette chaleur peut néanmoins être réalisée par les parois de tube laser à section très étroite (de l'ordre du mm^2). Ces lasers sont appelés lasers capillaires ou

lasers guides d'ondes. Des lasers guides d'ondes ont pu permettre une plage d'accord allant jusqu'à 10^9 Hz sur chaque raie.

L'excitation peut être obtenue par des décharges électriques très brèves et très intenses dans le gaz à pression atmosphérique, entre des électrodes rapprochées de quelques centimètres et placées longitudinalement dans le tube. Ce type de laser, le laser T.E.A. (Transversely Excited Atmospheric) est capable de fournir des impulsions de quelques ns avec une puissance crête atteignant 10^{10} W. Ces performances rivalisent avec celles des lasers solides au néodyme, et les études sur ce laser sont poursuivies activement, notamment afin d'obtenir la fusion nucléaire contrôlée.

Par suite de la pression élevée utilisée dans le laser T.E.A, la plage d'accord de fréquence peut atteindre 10^{10} Hz sur chaque raie. Il a même été possible d'utiliser de pressions allant jusqu'à $2 \cdot 10^6$ Pa. Dans ces conditions, les différentes transitions de vibration-rotation sont suffisamment élargies pour se recouvrir entièrement et les émissions laser peuvent être accordées sur n'importe quelle longueur d'onde entre 9 et 13 μm .

V-2-2- Applications du laser CO₂

Sur la figure 6, nous reproduisons le schéma type d'un dispositif au laser CO₂.

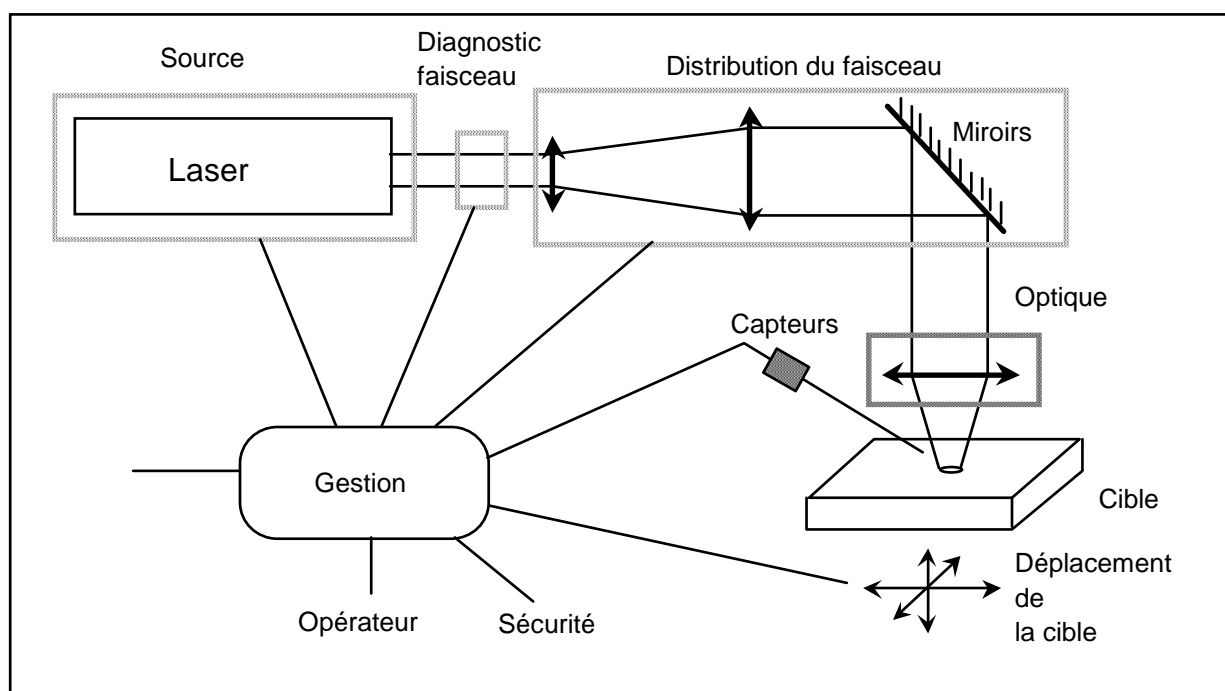


Figure 6: Schéma type d'une installation laser CO₂

V-2-2-1- Applications en médecine:

Utilisés en chirurgie, ils ont des puissances comprises entre quelques Watts et 80 Watts; ce qui, compte tenu de leur rendement relativement bon, conduit à des appareils mobiles à refroidissement autonome et nécessitant seulement une alimentation électrique de faible puissance (2 à 4 kV en monophasé).

Il faut toutefois prévoir une certaine consommation de gaz car la plupart des appareils actuels ne sont pas scellés et leur alimentation se fait généralement par une bouteille de mélange de CO₂, d'azote et d'hélium aux proportions spécifiées par le constructeur. A titre d'exemple; une bouteille standard de 20 litres de gaz comprimé à 200 bars permet d'assurer quelques dizaines d'heures de fonctionnement de l'émetteur laser.

L'émission est le plus souvent continue et un obturateur placé sur le trajet du faisceau permet de transmettre des créneaux de durée regardable entre 0,05 et 1 seconde. La puissance est mesurée à la sortie du tube laser et affichée sur le tableau de commande, après réduction d'un certain pourcentage (10 à 30% suivant les modèles), pour tenir compte de l'atténuation du système de transmission.

Le faisceau laser a une longueur d'onde de 10,6 μ m dans l'infrarouge et il est visualisé par le faisceau rouge d'un petit laser He-Ne de 1 à 2 mW.

Le mode d'émission se traduit par une divergence très faible de 2 mrad environ et une répartition gaussienne dont le maximum central favorise la découpe des tissus.

La transmission du faisceau s'effectue au moyen d'un bras articulé à miroirs. Toutefois, il existe un autre mode de transmission basé sur des fibres spéciales pour l'infrarouge, dont les plus performantes permettent de transmettre une puissance de quelques dizaines de Watts sur une longueur d'un mètre. La transmission du faisceau par la fibre permet d'élargir le champ d'application du laser CO₂ et, en particulier, d'aborder le traitement des lésions internes, par voie endoscopique. Toutefois, il ne faut pas oublier que les réflexions multiples à l'intérieure de ces fibres détruiront partiellement la cohérence du faisceau qui ne pourra être focalisé aussi finement.

V-2-2-1-1- Application oto-rhino-laryngologistes:

Le laser CO₂ utilisé, émettant en continu, est relié, par bras optique, à un bio-microscope couplé à un laryngoscope. Les interventions se font donc sous anesthésie générale. Certaines applications ont vu leurs traitements et leurs pronostics totalement modifiés par l'emploi du laser.

La papillomatose laryngée, la maladie des jeunes enfants entraînant jusqu'alors une trachéotomie dans 50% des cas, ainsi que l'aphonie, le plus souvent compliqué des cas

d'atrophie du larynx, sont à l'origine de multiples et longues hospitalisations pour un résultat peut satisfaisant. Grâce au laser, il semble que la maladie puisse être guérie sans perte de la voix, sans complication, sans trachéotomie, et au cours d'une hospitalisation de 48 heures.

V-2-2-1-2- Applications en dermatologie:

Du fait de son accessibilité, la peau occupe une place privilégiée dans l'étude des effets des rayonnements, et on particulier du laser, sur les tissus vivants.

En dermatologie, le laser CO₂ est très utilisé. Il est employé pour volatiliser et détruire de petites tumeurs cutanées ou muqueuses. La volatilisation des tumeurs bénignes de la peau telles que les verrues, certains gains de beauté et les kératoses séborrhiques a pu être effectuée avec le laser CO₂.

Le laser CO₂ est utilisé aussi pour le traitement du tatouage. Les résultats sont variables; ils vont de l'effacement du "dessin" cutané sans réaction à l'échec complet, en passant par l'effacement graphique remplacé par une cicatrice chéloïde dont le caractère esthétique est très discutable.

V-2-2-1-3- Applications gynécologiques:

En gynécologie, le laser CO₂ apporte au médecin une aide précieuse en chirurgie classique et en microchirurgie tubaire. Utilisé avec une pièce à main ou dirigé par l'intermédiaire d'un colposcopie, le faisceau laser CO₂ permet le traitement d'un certain nombre de lésions du col utérin, de la vulve et du vagin. Au niveau du col utérin ce sont essentiellement les dysplasies qui bénéficient de la thérapie laser. Ces lésions, caractérisées par la présence d'un tissu atypique surviennent chez les femmes jeunes (20-30 ans) avec une fréquence de 2 à 4%. Or, on sait que dans 60% des cas, leur évolution vers la "concerisation" est possible. Par sa précision de destruction en surface et en profondeur, du caractère aseptique de l'intervention, de la cicatrisation plus rapide, de la meilleure qualité obtenue et de l'absence de phénomènes de sclérose post-thérapeutiques, le laser CO₂ paraît nettement supérieur aux autres techniques de traitement local comme l'électrocoagulation ou la cryothérapie.

Au niveau vulvo-vaginal, le laser CO₂ est employé pour détruire rapidement, sans douleur et sans hémorragie, de petites tumeurs telles les condylomes ou les lésions dystrophiques.

V-2-2-2- Applications dans les traitements des métaux:

V-2-2-2-1- Soudage continu par pénétration :

Avec des lasers multi-kW CO₂ continue, on effectue des soudures étroites, profondes, sans distorsion, sur des pièces en acier d'une épaisseur de l'ordre de 1 cm, à des vitesses

voisines du mètre par minute. Ces soudures par pénétration sont analogues sur nombreux points à celles que l'on réalise avec des faisceaux d'électrons. L'intérêt du laser réside essentiellement dans les vitesses élevées de soudage qu'il permet d'atteindre en atmosphère libre. Les processus initiaux de la pénétration dépendent de la longueur d'onde du faisceau, de sa puissance spécifique et de l'état de surface du métal à souder, tandis que la propagation du cordon de soudure dépend plus particulièrement de la puissance totale du rayonnement incident.

V-2-2-2-2- Trempe superficielle:

Dans ce processus, le faisceau irradie brièvement la surface du matériau à traiter. L'énergie est absorbée dans la couche superficielle très mince et convertie en chaleur. La chaleur est ensuite conduite rapidement par diffusion dans la masse de la pièce. Il en résulte un effet de trempe. En ajustant très précisément ce cycle thermique, on obtient ainsi une modification de la microstructure du métal d'une phase solide à une autre sans utiliser de liquide de refroidissement; on produit donc une auto-trempe.

V-2-2-2-3- Alliages superficiels:

La technique de l'alliage superficiel, ou alliage de couverture, est devenue avec le laser un procédé économiquement rentable. Les éléments, mélangés au préalable, sont déposés sur la pièce à traiter, soit sous forme de poudre soit sous forme de feuilles. Le faisceau laser, en général issu d'un laser CO₂ multi-kW, est ensuite déplacé sur la pièce, à une vitesse plus lente qu'en temps thermique car une fusion superficielle est désirée ainsi qu'une diffusion dans la masse. Ce traitement est une transformation de type liquide-solide où les gradients de température recherchés sont très intenses afin que les vitesses de mélange et de diffusion soient très élevées. Après le passage du faisceau, la surface se solidifie et les grandes vitesses de refroidissement réalisées permettent à l'alliage de couverture d'acquies une structure minéralogique homogène et fine. L'épaisseur de cette structure, égale à la profondeur de diffusion des additifs, est une fonction de l'intensité du faisceau et de la vitesse de balayage.

V-2-2-2-4- Découpe:

Le laser CO₂ est couramment employé dans les travaux de découpe des matériaux métalliques et non métalliques. Pour des épaisseurs de 1 à 15 mm, les puissances continues nécessaires excèdent rarement 500 W pour des matériaux de faible absorption à la longueur d'onde du CO₂.

Les applications industrielles sont très nombreuses. Mentionnons les matériaux fibreux comme le textile qui ont donné lieu à une nouvelle technologie de confection industrielle basée sur le découpe de vêtements avec des lasers CO₂ de 200 à 400 W opérant à 80 m/mn et

produisant une coupe sans effilochage. La découpe du cuir, intéressant les fabricants de chaussures et de maroquinerie, utilise des sources de 50 W découpant à 0,3 m/mn, ou des sources à 300 W découpant à plusieurs mètres par minute. Dans ces deux applications, l'ordinateur gère aussi bien le positionnement des patrons de façon à minimiser les chutes que le fonctionnement des tables mobiles ou le fonctionnement du laser. Mentionnons aussi la découpe du bois, de plastique, de tuyaux renforcés de fils textiles ou de matériaux tel que l'alumine dans lesquels des formes complexes sont coupées sur des épaisseurs allant jusqu'à 0,6 mm à la vitesse de 1m/mn avec un laser CO₂ de 205 W de puissance.

V-3- LES LASERS A COLORANTS:

V-3-1- Processus physiques:

De nombreux colorants organiques, c'est-à-dire des composés organiques liquides qui absorbent efficacement certains rayonnements situés dans le visible, présentent aussi une fluorescence très intense qui couvre souvent une large bande située également dans le visible. C'est cette dernière propriété unique, découverte à l'occasion d'études de colorants pour le déclenchement des lasers à rubis par absorbant saturable, qui permet d'obtenir une accordabilité appréciable de la fréquence des lasers à colorants: on appelle accordabilité d'un laser à colorant la possibilité de balayer la fréquence d'émission sur des intervalles importants (10 à 100 nm), alors que les lasers à isolant dopé ou à gaz ne le permettent qu'à l'intérieur d'une largeur de raie relativement étroite (10^{-2} à 1 nm). Cette accordabilité est extrêmement précieuse pour des applications telles que la spectroscopie, la photochimie ou encore la séparation isotopique.

Le fonctionnement des lasers à colorants est impulsionnel. Néanmoins, il est possible de les faire fonctionner de façon continue. En raison de la valeur extrêmement élevée du gain à faible signal, le volume actif nécessaire peut être très petit. Néanmoins, l'échauffement consécutif à l'absorption intense de la pompe, associé à l'accroissement rapide de la population de l'état triplet, nécessite un renouvellement continu de la zone pompée, c'est-à-dire une circulation rapide du colorant ainsi que l'utilisation de solvants appropriés. En son absence, le colorant subit une photo-dégradation importante qui diminue sensiblement le gain du laser.

Une autre propriété de base des molécules de colorants organiques est que le pic du spectre d'absorption se situe à des longueurs d'ondes plus petites que celles du spectre correspondant de l'émission.

Les modes de pompage des lasers à colorants sont très variés. La source de pompe doit émettre fortement dans le voisinage d'une bande d'absorption du colorant, l'émission se faisant à une énergie moindre. La rhodamine 6G, dont la fluorescence est centrée vers 580 nm peut être pompée entre 500 et 550 nm. Un colorant tel que la coumarine 2 dont la fluorescence est

centrée autour de 450 nm, soit le bleu indigo, doit être pompé avec un rayonnement UV. La puissance émise dépend de la longueur d'onde de pompe, du coefficient d'absorption du colorant utilisé et aussi du solvant. On distingue principalement deux classes de techniques de pompage.

V-3-1-1- Le pompage par lampes flash:

Cette méthode simple utilise des configurations semblables à celles des lasers à isolants dopés : par exemple, un tube contenant le colorant en circulation est placé au foyer d'une cavité elliptique pompée par un Flash linéaire dont le temps de montée en puissance est très rapide, situé à l'autre foyer de façon parallèle. Cette méthode de pompage large bande, permet d'engendrer des puissances crêtes de 1 à 5 kW sur des durées de 0.2 μ s à 1 μ s. Soit des énergies par impulsion comprises entre 1 et 5 mJ, à des cadences pouvant atteindre 100 Hz.

V-3-1-2- Le pompage par laser:

C'est la méthode utilisée par exemple pour le fonctionnement continu d'un laser à colorant. Dans ce cas, un laser à argon ionisé de forte puissance est focalisé sur un colorant en circulation. Si le foyer est de très petit diamètre (10 μ m environ) et si l'écoulement est rapide (10 m/s), le temps de transit des molécules est bref, de l'ordre de microseconde, et l'efficacité du pompage est très élevée. Avec un laser à argon émettant 4 W sur la raie verte à 514,5 nm, on obtient ainsi couramment 100 mW dans le rouge sur une plage accordable de 50 nm environ, spécifique de la rhodamine utilisée. Dans le bleu, les puissances sont plus faibles, 30 mW avec une coumarine émettant entre 450 nm et 480 nm. Dans les modèles plus récents de lasers à colorants continus, la solution organique traverse la cavité sous forme d'un jet libre de très faible épaisseur (30 μ m). Dans ces conditions, on peut disposer de niveaux de puissance de l'ordre de 25% de la puissance de pompe incidente, ce qui par la substitution de divers colorants offre plus de 200 mW sur tout le visible et jusqu'à 1W dans le jaune. Ajoutons que ces lasers peuvent être rendus très stables en fréquence et peuvent fonctionner en modes couplés avec des impulsions d'une durée typique de 1,5 ps.

Les lasers à colorants impulsions utilisent trois types de lasers de pompe suivant les applications et les budgets. Dans les basses énergies, la pompe est un laser à azote émettant à 337.1 nm. Il en résulte des impulsions brèves d'une durée de 2 ns avec au mieux une énergie de 0.1 mJ que l'on peut répéter à la cadence de 100 Hz. Bien que les puissances moyennes soient très faibles (10 mW), on dispose ainsi de puissances de crêtes conséquentes (50 kW). Les largeurs de raies réalisables sont de 0.2 cm^{-1} et la plage d'accordabilité s'étend de 350 nm à 650 nm. Aujourd'hui, la technique la plus courante pour le pompage des lasers impulsions à colorants, est d'utiliser un laser Nd:YAG doublé en fréquence ($\lambda = 532$ nm) ou encore triplé

($\lambda=355$ nm) au sein d'un cristal non linéaire. Avec un pompage transverse du colorant en circulation rapide dans un capillaire, on obtient ainsi des énergies impressionnantes voisines de 100 mJ par impulsion à $\lambda = 560$ nm avec des rhodamines, et 30 mJ à 460 nm avec des coumarines. Les cadences pouvant atteindre 30 Hz. Les puissances crêtes sont alors de plusieurs MW pour des largeurs de raie de 0.05 cm^{-1} environ. En remplaçant successivement les colorants pour les adapter aux domaines spectraux considérés, et en utilisant des techniques non-linéaires de génération d'harmoniques ou de mélange de fréquences, on peut accorder la fréquence d'émission du laser à colorant sur une large étendue couvrant tout le visible. Un autre type de laser impulsif de pompe est de plus en plus utilisé, le laser à excimère XeCl émettant à 308 nm. Cette technique, tout à fait semblable à la précédente, semble mieux adaptée aux émissions dans le bleu ou le proche UV et elle complète la technique Nd:YAG dans la région spectrale où son efficacité de pompage est nettement moindre du fait de la nécessité d'effectuer le triplage ou quadruplage de la fréquence fondamentale (106.4 nm).

V-3-2- Application des lasers à colorants:

V-3-2-1- Séparation isotopique:

Des réglages optiques très précis vont sélectionner la longueur d'onde désirée. La possibilité de pouvoir régler très précisément la longueur d'onde (et donc l'énergie des photons) peut avoir des applications par exemple dans le procédé d'enrichissement par laser; un laser à colorant va produire des photons d'une longueur d'onde pouvant exciter l'atome d'uranium 235 mais pas l'atome d'uranium 238, or l'excitation d'un atome est, en fait, un changement de niveau d'énergie pour l'électron. Quant l'électron a capté assez d'énergie apportée par des lasers à colorant, il quitte l'entourage de l'atome que devient alors un ion. Une fois chargé positivement, l'uranium 235 est attiré par des plaques chargées négativement. Le procédé permet donc de sélectionner rapidement entre les atomes d'uranium 238.

V-3-2-2- Spectro-fluorométrie moléculaire:

La fluorimétrie peut être définie comme une méthode optique mettant à profit l'absorption par les molécules d'une radiation (généralement un laser), suivie de l'émission instantanée d'une radiation de longueur d'onde plus grande que la longueur d'onde de la lumière excitatrice c'est l'intensité de la lumière de fluorescence qui est mesurée. comme il existe une proportionnalité entre la concentration et la fluorescence, il est possible d'appliquer cette méthode à des études quantitatives.

La fluorimétrie est une méthode de choix pour l'analyse dans les milieux biologiques de médicaments ou de substances naturelles à concentrations très faibles.

L'utilisation de la fluorimétrie en toxicologie et en biochimie clinique pour le dosage des acides aminés et leurs métabolites, des hormones stéroïdes, des enzymes et des vitamines est devenue une pratique courante dans les laboratoires

En conclusion la spectrofluométrie est une méthode analytique caractérisée par sa spécificité (nécessité de sélectionner une longueur d'onde d'excitation déterminée et une longueur d'onde d'émission) et une grande sensibilité permettant de doser certaines molécules dont la concentration est voisine du picogramme par litre.

V-4- LES LASERS A SEMI-CONDUCTEURS:

Peu de temps après l'observation d'une émission laser à partir d'ions actifs implantés dans les solides, ou bien à partir d'atomes en phase gazeuse, la faisabilité d'une émission laser au sein d'un semiconducteur fut démontrée expérimentalement dans l'arséniure de gallium AsGa et rapidement ensuite dans de nombreux autres semiconducteurs.

Malgré l'existence d'un fil conducteur commun, l'émission stimulée, les reliant à tous les autres lasers, les lasers à semi-conducteurs diffèrent profondément de ceux-ci dans leurs principes. La caractéristique essentielle qui les distingue vient de ce que les électrons qui participent à l'émission laser peuvent se déplacer librement dans une vaste zone du semi-conducteur et sont par conséquent dépendants du potentiel périodique spatial du réseau cristallin du matériau semi-conducteur.

Contrastant avec les lois de l'équilibre thermodynamique des atomes et des molécules pour lesquels la population, dans les différents états l'énergie, est exprimée par la relation de Boltzmann, les différents états d'énergie d'un semi-conducteur ne peuvent être occupés que par deux électrons en raison du principe d'exclusion de Pauli. Les populations étant alors gouvernées par la statistique de Fermi-Dirac. A la température du zéro absolu, tous les niveaux électroniques sont remplis jusqu'à une certaine valeur E_F , appelée énergie de Fermi; les niveaux supérieurs ($E > E_F$) sont vides.

Dans un semi-conducteur, les énergies électroniques autorisées sont réparties en bandes d'énergie bien déterminées. Entre ces bandes se trouvent des valeurs d'énergie interdites à tout électron. La bande pleine, dont l'énergie électronique autorisée est la plus élevée est la bande de valence. Les états partiellement occupés ou même inoccupés de la bande voisine d'énergie supérieure forment la bande de conduction du solide. La différence entre l'énergie du sommet de la bande de valence et celle du bas de la bande de conduction, s'appelle écart énergétique E_g ou "gap" d'énergie.

Comme tout laser, les deux processus opposés de l'absorption et de l'émission seront en compétition dans un laser à semi-conducteur. Il faut donc des courants assez élevés pour maintenir un gain positif entre l'émission stimulée d'une part et les pertes par absorption ou par couplage vers l'extérieur d'autre part. Le début de l'émission laser est ainsi caractérisé par le rétrécissement soudain de la plage spectrale d'émission, ainsi que par l'augmentation très nette de la puissance émise, proportionnellement au courant de la diode. Le courant de seuil augmentant avec la température, il est plus simple de refroidir le semi-conducteur en général à 77 K pour obtenir une oscillation continue. Des puissances de quelques watts sont ainsi émises dans le proche infrarouge. En fonctionnement impulsionnel, ce mode d'opération étant le plus courant, on obtient des puissances crête de plusieurs watts à température ambiante et beaucoup plus à 77 K.

Les lasers à semi-conducteurs, fabriqués à partir d'un seul semi-conducteur (AsGa, CdS, PbS, AsIn, SbIn), appelés lasers à homojonction, présentent un certain nombre d'inconvénients par rapport aux autres types de laser.

VI- CONCLUSION

Ce travail a donc permis de rappeler l'histoire de la technologie des lasers, le principe de leur fonctionnement, leurs différents types, leurs caractéristiques et particularités et leurs principaux domaines d'utilisations et d'applications.

D'autres nouveaux lasers ont dernièrement vu le jour, dont on peut raisonnablement espérer qu'ils seront appelés à des développements scientifiques ou industriels importants. Parmi ces lasers, on trouve :

- Le laser à alexandrite: le problème posé par la plupart des lasers à isolant dopé est qu'ils ne sont presque jamais accordables. Le laser à alexandrite, non commun pour le chrysobéryl dopé au chrome (Cr^{3+} : BeAl_2) est récemment apparu comme étant le seul laser à isolant dopé qui peut être continuellement accordable sur une large bande de 700 à 815 nm.

- Les lasers à vapeur de cuivre: ce sont de nouveaux lasers à gaz émettant dans le visible sur deux longueurs d'onde principales 510 nm et 578 nm (vert). Ils nécessitent la mise œuvre de hautes températures (800 K à 1300 K) pour vaporiser les atomes de cuivre. Ces lasers émettent en impulsions à très haute cadence, 3 à 5000 Hz, produisant des puissances crêtes de 100 kW et des énergies par impulsion de 5 mJ.

- Les lasers à électrons libres: ils font l'objet de recherches très importantes car ils devraient permettre de pallier certains des inconvénients des lasers actuels en offrant des puissances moyennes assez élevées (des centaines de watts dans l'UV) et en étant

simultanément accordables dans une très large plage de longueurs d'onde allant de 100 nm à 100 μm .

REFERENCES

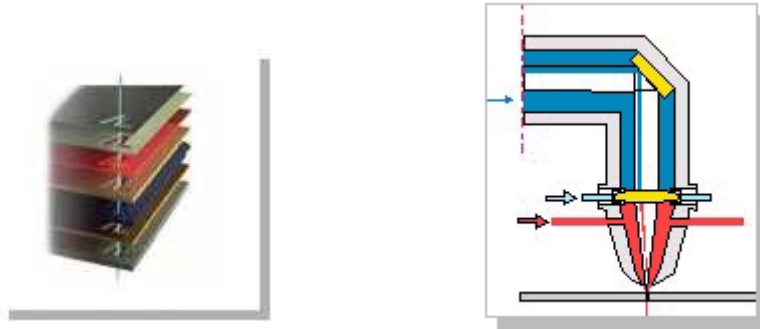
- 1- H. MAILLET et al.
Le laser: principe et techniques d'application
Lavoisier, technique et documentation, Paris, France, 1984
- 2- Cours de physique atomique de 4^{ème} année physique 2002-2003
Faculté des Sciences de Meknès, Maroc
- 3- Cours de 3^{ème} année de pharmacie, 2003
Faculté de Médecine et Pharmacie, Rabat, Maroc.
- 4- R. RAFHI et M. A. ASSAD
Laser et Industrie
Mémoire de DESA, 2002 - 2003
Faculté des Sciences Ben M'sik, Casablanca, Maroc.
- 5- R. FABBRO
Traitement des matériaux par laser: processus physiques et exemples d'applications
Ecole des lasers et leurs applications, 15 - 19 décembre 2003, Tanger, Maroc
- 6- A. WAGUE et al.
Thérapie Photo-dynamique
Ecole des lasers et leurs applications, 15 - 19 décembre 2003, Tanger, Maroc
- 7- Z.HAJJI et A.BERRAHO
Application du laser en ophtalmologie
Ecole des lasers et leurs applications, 15 - 19 décembre 2003, Tanger, Maroc
- 8- <http://web.hec.ca/virtuose/index.cfm?page=229>
- 9- http://www.lcpc.fr/fr/sources/gdsouvrages_monde/maroc.dml
- 10- http://www.france.airliquide.com/fr/business/gas_appli/coating/welding_laser.asp

ANNEXE 1**QUELQUES EXEMPLES DE LASERS**

Type de laser	Milieu laser	Particules excitables	Couleur
Diodes laser	Semi-conducteur	Electrons-trous	Rouge -infrarouge
Laser hélium-néon	Gaz hélium-néon	Atomes de néon	Rouge
Laser à rubis	Rubis (solide)	Ions chrome	Rouge
Laser argon	Gaz de krypton	Ions argon	Bleu et vert (ultraviolet)
Laser krypton	Mélange de gaz rare et d'halogène Les plus courants sont les mélanges de xénon et chlore ou de krypton et fluor	Ions krypton	Rouge
Laser à excimer	Vapeur de cuivre	Groupeement de deux atomes excités	Invisible (ultraviolet)
Laser à vapeur de cuivre	Mélange gazeux constitué d'azote, d'hélium et de dioxyde de carbone	Atomes de cuivre (deux niveaux d'excitation)	Vert et jaune
Laser CO ₂	Grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme	Molécules de CO ₂	Invisible (infrarouge)
Laser Nd:YAG	Verre dopé au néodyme (solide)	Ions de néodyme	Invisible (infrarouge)
Laser Verre-néodyme	Colorant dans un solvant	Ions de néodyme	Invisible (infrarouge)
Laser à colorant	Colorant dans un solvant	Molécules de colorant	Différentes plages de couleurs en fonction du colorant

ANNEXE 2**PRINCIPALES UTILISATIONS DES LASERS EN FONCTION DE LEURS APPLICATIONS**

Utilisation	Puissance	Mode de fonctionnement	Remarques générales
Lecture des disques compacts Lecture des codes-barres dans les supermarchés	Quelques mW	Continu	Petites diodes laser qui s'intègrent dans les appareils comme des composants électroniques ordinaires
Lasers d'alignement pour les travaux publics ou les carrossiers.	~ 10 mW	Continu	Petits lasers (par exemple les lasers hélium-néon)
Lasers de transport de télécommunications	Quelques dizaines de mW	Continu ou impulsionnel	Petites diodes laser. Les faisceaux laser sont transportés à travers toute la planète et sur de très longues distances le long de fibres optiques tendues sous terre ou dans la mer,
Discothèques, spectacles lasers	Quelques watts	Continu	Lasers à argon ou à hélium-néon, par exemple
Applications médicales. Chirurgie interne: opérations sans ouvrir le corps Chirurgie externe: soins de l'œil (décollements de rétine) et soins des dents (caries).	La puissance est fonction des applications	Continu ou impulsionnel	Lasers YAG ou lasers à CO ₂ . Les lasers utilisés pour des applications médicales sont assez puissants. Ils peuvent brûler une partie endommagée dans le corps, souder la rétine sur l'œil... mais attention, le médecin ou le dentiste doivent avoir la main sûre. Cependant, aucun autre instrument ne permet une intervention aussi précise.
Nettoyage et préparation des surfaces (par exemple, décapage aux lasers des monuments historiques)	Les puissances, crêtes sont de l'ordre de 10 ⁷ à 10 ⁸ W (des puissances de 10 à 20 W pour les lasers YAG, par exemple)	Impulsionnel (très courtes impulsions: quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes)	Lasers excimers ou laser YAG. Ce procédé permet d'éliminer totalement ou de façon sélective des couches surfaciques recouvrant différents matériaux sans les altérer en dessous, en concentrant le faisceau laser sur les zones à décaper.
Procédé d'enrichissement de l'uranium par lasers	Quelques centaines de watts	Impulsionnel	Lasers à vapeur de cuivre pompant des lasers à colorant (lasers discontinus: 5000 impul/seconde)
Soudage des métaux	Quelques dizaines de watts à 50 kW puissance selon l'épaisseur	Continu ou impulsionnel	Lasers YAG (100 W à 2 kW) Lasers CO ₂ (100 W à 50 kW)
Découpage de matériaux tels que le bois, le plexiglas ou les métaux	1 à 3 kW	Continu ou impulsionnel	
Lasers de puissance de recherche	Quelques térawatts	Impulsionnel	

ANNEXE 3**TRAVAIL ET TRAITEMENT DES METAUX****A- Coupage laser:**

Un faisceau laser est focalisé sur le métal de base et un jet de coupage éjecte le métal fondu. Ce procédé est utilisé principalement sur les métaux minces lorsque les impératifs sont la haute précision et une productivité élevée.

Les principales applications résident dans le coupage des aciers au carbone, par exemple chez les constructeurs automobiles ou leurs fournisseurs, et dans la réalisation des composants en acier inoxydable communément utilisés dans l'industrie alimentaire.

Le procédé de coupage laser peut être appliqué à tous les matériaux : bois, métaux, tissus ou plastiques (PE). Le faisceau laser est produit par décharge électrique à l'intérieur d'une cavité remplie d'un milieu gazeux contenant principalement de l'azote, du dioxyde de carbone et de l'hélium. Certaines applications font appel à une source laser à solide, dans laquelle le faisceau laser est produit par excitation d'un barreau solide de grenat yttrium-aluminium (YAG).

B- Soudage hybride Arc/Laser:

EXIAL est un procédé de soudage hybride arc / laser (YAG ou CO₂).

B-1- Domaines d'applications:

- Rabotage de tôles aciers revêtues ou non, aluminium et ses alliages en carrosserie automobile
- Soudage continu de tubes inox
- Soudage de pipes
- Soudage de fortes épaisseurs

B-2- Avantages du procédé :

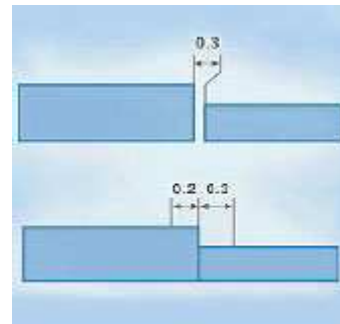
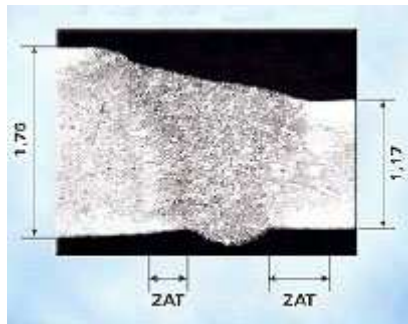
- gain en vitesse de soudage par rapport au LASER



- accroissement des tolérances d'accostage
- accroissement des tolérances du suivi de joint

B-3- Exemples

Résultats obtenus pour un soudage de flancs raboutés en utilisant le procédé EXIAL: des améliorations très significatives.



Soudage d'une épaisseur de 0.7 mm sur une épaisseur de 1.2 mm, en utilisant une installation équipée d'un laser de 3 KW :

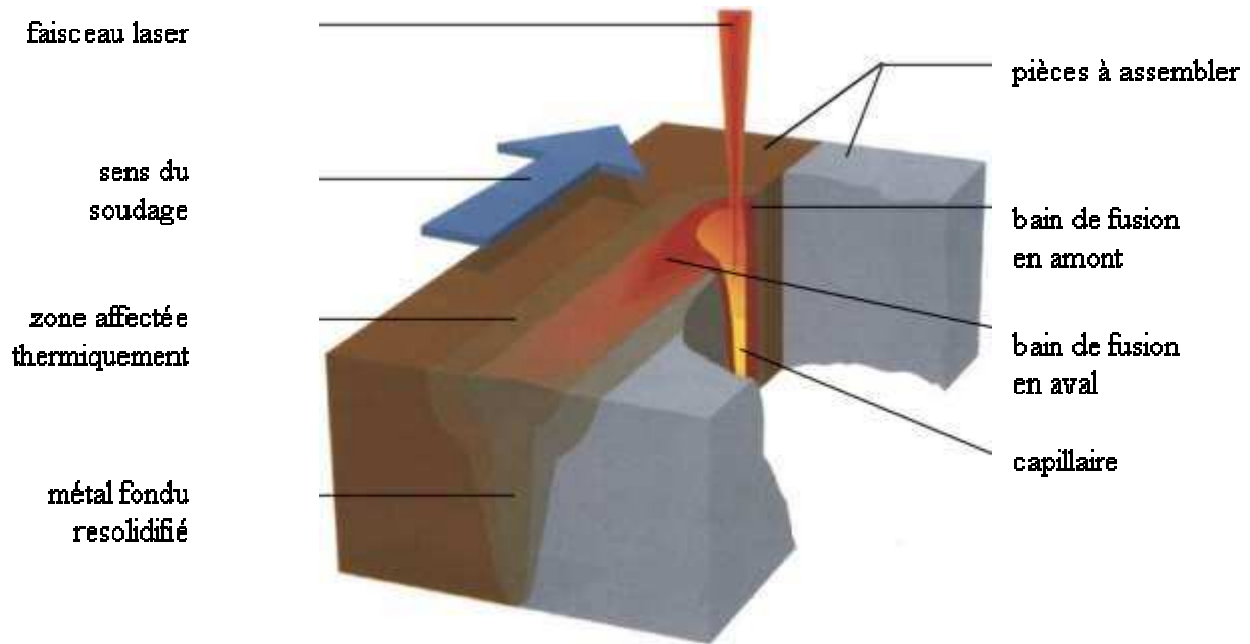
- La vitesse de soudage est augmentée de 4m.min^{-1} en utilisant le laser seul, à $7,4\text{m.min}^{-1}$ avec le procédé EXIAL.
- La tolérance d'accostage sur les parties assemblées augmente de 5/100 à 15/100 de mm
- Les tolérances sur le positionnement de la torche par rapport au plan de joint augmentent de 1/10 de chaque côté à 2/10 sur la tôle la plus fine et de 3/10 sur la tôle la plus épaisse.

C- Soudage métallique:

C-1- Principe:

Un système optique concentre l'énergie du faisceau laser (10^5 W/cm^2 à 10^6 W/cm^2) et génère un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se re-solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces.

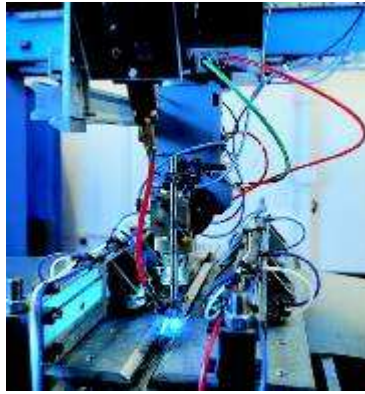
C-2- Les caractéristiques:

*Principe du soudage laser***C-2-1- Soudage par laser YAG***Soudage par laser YAG de pot d'échappement*

- ◆ Flexibilité, soudage 3D, multiposte grâce à la fibre optique
- ◆ Grande précision d'assemblage, maîtrise du faible dépôt d'énergie en laser YAG pulsé
- ◆ Le laser YAG continu permet d'obtenir des performances comparables au laser CO₂, avec l'avantage de la fibre optique mais pour un coût généralement plus élevé

C-2-2- Soudage par laser CO₂

- ◆ Vitesse élevée, cordon fin, faibles déformations.
- ◆ Précision d'assemblage, pas ou peu de reprise.
- ◆ Adapté à une large gamme de matériaux métalliques, jusqu'à des épaisseurs de 10 mm.
- ◆ Découpe et soudage possible avec la même source laser.



Rabotage de tôle en aluminium par laser CO₂ avec fil d'apport

C-3- Exemples d'applications industrielles:

C-3-1- Soudage par laser YAG



Pacemaker avant soudage



pacemaker après soudage

- ◆ Soudage par points de lames de rasoirs .
- ◆ Soudage de plaques de tôle pour rotor et stator
- ◆ Soudage d'éléments de carrosserie en aluminium
- ◆ Soudage de boîtiers de filtres à essence en aluminium
- ◆ Soudage de maillons de chaîne de bijouterie en or.
- ◆ Soudage étanche de pacemakers en titane

C-3-2- Soudage par laser CO₂

- ◆ Soudage de réparation de carters de turboréacteur.
- ◆ Soudage d'échangeurs thermiques en inox
- ◆ Soudage de pignonnerie (boîte de vitesse automobile)
- ◆ Soudage de boules de pétanque
- ◆ Soudage d'éléments de carrosserie automobile
- ◆ Soudage de scies diamantées



Soudage de pièces de transmission

ANNEXE 3

LE CD-ROM

Le CD (disque compact) a été inventé par Sony © et Philips © en 1981. En 1984, les spécifications du disque compact ont été étendues afin de lui permettre de stocker des données numériques (CD-ROM ou ROM vient de l'anglais *Read Only Memory*). Depuis, plusieurs types de CD ont émergés, que l'on peut distinguer par ces différents sigles identifiant les lecteurs optiques qui y sont associés.



Le CD est un disque de 12 cm de diamètre et de 1,2 mm d'épaisseur (l'épaisseur varie de 1,1 à 1,5 mm) qui permet de stocker des informations numériques, c'est-à-dire correspondant à 800 Mo de données informatiques. Un trou circulaire de 15 mm de diamètre au milieu du CD permet de le centrer.

Le CD se compose de trois couches superposées comme il est illustré ci-dessous. La couche principale qui est la plus épaisse est en polycarbonate, un plastique résistant et transparent (1). Ce plastique laisse passer la lumière émise par le laser lors de la lecture d'un CD. On trouve ensuite une couche métallique réfléchissante (2) très souvent en aluminium qui va réfléchir la lumière émise par le laser. Il y a par dessus tout ça une couche de vernis protecteur qui vient protéger le métal de l'agression des Ultra Violets (3). Par dessus le tout, on trouve la surface imprimée qui sert à habiller le disque (4).



Lors de la lecture d'un CD, le faisceau laser traverse la couche de polycarbonate et rencontre ou non un creux. Le faisceau est ensuite réfléchi par la couche métallique. Le passage d'un creux à une bosse ou d'une bosse à un creux représente un 1 dans le langage binaire. Le

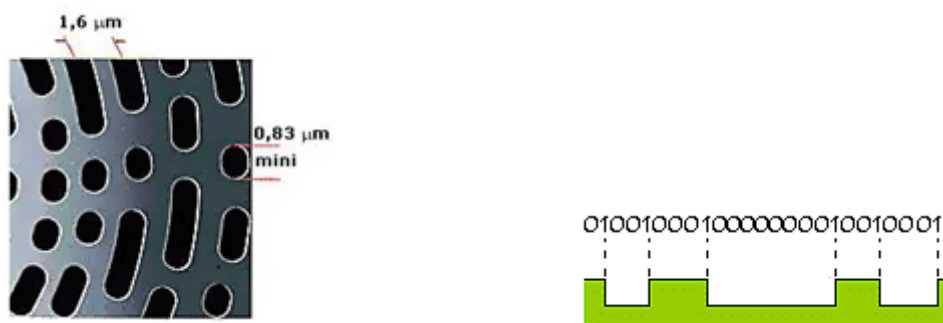
reste représente un 0. La lumière du laser est alors fortement déviée (on dit qu'elle est réfractée), de telle sorte que la dose de lumière renvoyée par la couche réfléchissante est minime. Le lecteur comprend alors qu'il s'agit d'un 1. La longueur du motif qui suit, qu'il soit bosse ou creux, donne la longueur du nombre de 0 situés après. La succession de 0 et de 1 permet ensuite de lire le contenu du disque. A noter que contrairement aux disques durs, un CD n'a qu'une seule piste organisée en spirale, comme il est illustré ci-dessous.



Comme le démontre l'image de droite, la courbe n'est pas régulière mais oscille autour de sa courbe moyenne: La fréquence de ces oscillations est de 22,05 kHz. Cette oscillation permet à la tête de lecture de suivre la courbe et de réguler la vitesse de rotation du CD.

A- Codage de l'information :

La piste physique est constituée d'alvéoles d'une profondeur de $0,168 \mu\text{m}$, d'une largeur de $0,67 \mu\text{m}$ et de longueur variable. Les pistes physiques sont écartées entre elles d'une distance d'environ $1,6 \mu\text{m}$. Le fond de l'alvéole est un creux, les espaces sont des plats.



C'est la longueur de l'alvéole qui permet de définir l'information. La taille d'un bit sur le CD est normalisée et correspond à la distance parcourue par le faisceau lumineux en 231.4 ns, soit $0,278 \mu\text{m}$ à la vitesse standard minimale de 1.2 m/s.

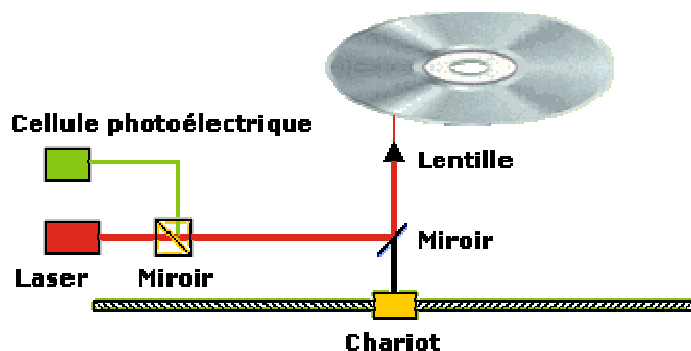
Comme il est illustré sur l'image de droite ci-dessus, il doit toujours y avoir au minimum deux bits à 0 entre deux bits consécutifs à 1 et il ne peut y avoir plus de 10 bits consécutifs à zéro entre deux bits à 1. C'est pourquoi la longueur d'une alvéole correspond au minimum à la longueur nécessaire pour stocker la valeur 001 ($0,833 \mu\text{m}$)= $3T$ et au maximum à la longueur correspondant à la valeur 00000000001 ($3,054 \mu\text{m}$)= $11T$.

Les CD pré-enregistrés de musique ou logiciels ne sont pas réinscriptibles car leurs alvéoles sont réalisées par moulage du polycarbonate sur le motif inverse. Une couche métallique est ensuite coulée sur le polycarbonate, qui est ensuite pris en sandwich sous une couche de laque protectrice, ce qui ne permet pas d'en modifier le contenu.

Les CD vierges (CD-R) possèdent une couche supplémentaire située entre le polycarbonate et la couche métallique composée d'un colorant organique pouvant être brûlé par un laser ayant 10 fois plus de puissance que la puissance requise pour lire un CD. Cette couche de colorant est photosensible. Lorsqu'elle est soumise à une forte lumière, elle l'absorbe et sa température augmente à plus de 250° , ce qui fait qu'elle brûle localement, et recrée les plages brûlées et non brûlées. Les creux et bosses du CD classique sont ici remplacés par le passage d'une zone brûlée à une zone non brûlée, qui laisse passer plus de lumière.

B- Fonctionnement d'un lecteur CD-ROM:

La tête de lecture est composée d'un laser émettant un faisceau lumineux et d'une cellule photoélectrique chargée de capter le rayon réfléchi. Une lentille située à proximité du CD focalise le faisceau laser sur les "trous et bosses" comme il est illustré ci-dessous.



C- Les deux modes de fonctionnement de lecteur:

- La lecture à vitesse linéaire constante notée CLV : Lorsqu'un disque tourne, la vitesse des pistes situées au centre est moins importante que celle des pistes situées sur l'extérieur, ainsi il est nécessaire d'adapter la vitesse de rotation du disque en fonction de la position de la tête de lecture.
- La lecture à vitesse de rotation angulaire constante notée CAV : elle consiste à avoir une faible densité de données sur la périphérie du disque et une forte densité au centre du disque. De cette manière, les débits sont les mêmes au centre et à la périphérie du disque. En revanche, la capacité est moindre.

ANNEXE 4

LA GRANDE MOSQUEE HASSAN II

Construite à Casablanca au Maroc, est composée de 5 parties bien distinctes:

- Le bâtiment Mosquée de 200 m x 100 m x 60 m Ht, couronné par une toiture ouvrante de 2 400 m² et comprenant entre autres : Une salle de prière d'une capacité de 25 000 personnes. Deux salles de prière latérales en mezzanines de 5 000 personnes chacune.
- Le Minaret : Tour de 200 m de hauteur avec un dôme couronné par un jamour de 16 m de hauteur **équipé d'un rayon laser de 40 km de portée.**
- Le Hamman : Bâtiment enterré de 2 niveaux.
- La Medersa : Bâtiment semi-circulaire de 3 niveaux.
- Le Parking : d'une superficie de 76 000 m² H.O.



